



La vulnérabilité des puits de carbone océaniques par rapport  
à l'acidification des océans

par  
Anne-Geneviève Poirier

Essai de double diplôme présenté au Département de biologie et au  
Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention des grades de  
maître en écologie internationale et de maître en environnement

Sous la direction de Madame Fanie Pelletier  
et de Monsieur Yves Gélinas

MAÎTRISE EN BIOLOGIE  
Cheminement de type cours en écologie internationale

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
Cheminement de type cours en gestion de l'environnement

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mai 2013

## Sommaire

Depuis le début de l'ère industrielle, une quantité importante de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) a été libérée vers l'atmosphère, ce qui a augmenté considérablement la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre. Ceci est dû principalement aux activités anthropiques qui émettent le plus de  $\text{CO}_2$ , notamment la combustion du carbone fossilisé, la déforestation par le feu et la fabrication de ciment. Ce déséquilibre dans le cycle du carbone est responsable de l'amplification de l'effet de serre et des changements climatiques subis actuellement sur Terre. Une autre conséquence de l'augmentation de la concentration du  $\text{CO}_2$  atmosphérique est l'acidification des océans. Plusieurs éléments sont inconnus quant aux effets de l'abaissement du pH de l'eau de mer sur les écosystèmes marins, dont les écosystèmes et les processus permettant de stocker du carbone à court ou à long terme, nommés des puits de carbone bleu.

Ces puits sont déjà soumis à de nombreuses menaces, et leur destruction pourrait grandement accélérer la libération de carbone vers l'atmosphère. L'instauration de mesures pour sauvegarder leur efficacité est donc impérieuse. Pour ce faire, une connaissance approfondie de l'impact de l'acidification sur les puits de carbone bleu aiderait assurément à faire un choix judicieux des mesures à mettre en place. Dans cette optique, le principal objectif de cet essai est d'identifier le ou les puits de carbone océaniques vulnérables à l'acidification des océans afin de prévoir des efforts de conservation et de restauration appropriés à chacun d'eux. Pour ce faire, il faut d'abord répertorier et décrire les systèmes et écosystèmes pouvant être définis en tant que puits de carbone bleu. Par la suite, il faut élaborer des critères d'analyse évaluant la vulnérabilité des puits de carbone bleu par rapport à l'acidification, puis effectuer cette analyse. Enfin, avec les résultats obtenus, il est possible de discuter de la priorité des puits à conserver ou à restaurer, de même que de différentes stratégies pour y arriver.

Les stratégies qui ressortent de cette discussion sont la création d'aires marines protégées, la mise en place d'une gestion intégrée des écosystèmes en collaboration avec les populations locales, la création d'incitatifs ou de désincitatifs économiques, puis la création de politiques

environnementales nationales. Un exemple d'incitatif économique est la création de crédits carbone pour le carbone séquestré par les puits de carbone bleu conservés ou restaurés. Cependant, avant qu'un pays puisse comptabiliser cette séquestration dans un bilan carbone national, il faudrait d'abord qu'il ait atteint sa cible de réduction d'émission de GES initial. De plus, un bon outil pour convaincre les gouvernements nationaux de prendre de telles mesures est de mettre de l'avant la valeur monétaire des écosystèmes et des services écologiques qu'ils fournissent. Les avantages économiques de mettre en place des mesures de protection par rapport aux coûts qu'ils occasionnent peuvent aussi être présentés à partir d'une analyse bénéfice-coût. Ainsi, peu importe la méthode sélectionnée, tous les puits de carbone bleu doivent être protégés, non seulement pour leur potentiel de séquestration du carbone, mais également pour leur biodiversité et tous les services écologiques qu'ils rendent aux populations humaines.

Néanmoins, pour contrer entièrement les effets de l'acidification et les menaces climatiques subies par les écosystèmes marins, il importe d'intensifier les efforts de réduction d'émission de GES et de réduire la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub>. Ceci s'applique en particulier pour réussir à protéger l'intégrité du processus de la pompe biologique, un des puits de carbone bleu les plus importants en terme de quantité de carbone séquestré, mais aussi un des plus vulnérables à l'acidification.

Enfin, les objectifs poursuivis dans cet essai ont pu être atteints, avec certaines réserves. En effet, plusieurs données sont toujours manquantes par rapport aux caractéristiques de certains puits de carbone océaniques, de même que par rapport aux effets de l'acidification des océans sur puits de carbone et sur la biodiversité en général. Cette analyse a donc permis de mettre en lumière le besoin d'effectuer plus d'études sur ces thèmes, mais également le besoin urgent de préserver les puits de carbone bleu existants et de maintenir les efforts de réduction d'émission de GES à l'atmosphère.

## Remerciements

La réalisation de ce document a été possible grâce à la contribution, aux conseils et aux encouragements de plusieurs personnes. Je tiens d'abord à remercier mes co-directeurs d'essai, Fanie Pelletier et Yves Gélinas. Ils m'ont fourni de judicieux conseils afin structurer mes idées et d'améliorer la qualité de ce document. Ils ont également fait preuve d'une grande patience envers moi.

Je voudrais ensuite remercier Caroline Cloutier, la personne désignée responsable de mon essai, qui a effectué le suivi de mon travail, ainsi que les corrections finales. Elle était présente pour répondre rapidement à mes questions, de même que pour me motiver à avancer dans mon cheminement.

De plus, je souhaite remercier les professeurs et les responsables des programmes de maîtrise en écologie internationale et de maîtrise en gestion de l'environnement qui m'ont permis de m'enrichir d'expériences inoubliables et des connaissances captivantes, ainsi que de m'outiller de compétences avantageuses. Ce bagage m'a servi à sélectionner mon sujet d'essai et à intégrer mon apprentissage multidisciplinaire dans ce travail finalisant mon parcours scolaire. Je n'oublie surtout pas mes collègues de maîtrise, qui m'ont aidé à progresser à chaque étape de ce double programme par leur coopération, leur amitié, leur complicité et leur solidarité.

Puis, je n'oublie surtout pas de remercier mes amis et mes parents, qui n'ont pas perdu espoir de voir l'aboutissement de ce projet. Ils ont su se montrer compréhensifs, puis m'encourager et me motiver tout en respectant mes méthodes et mon rythme. Je veux dire un merci particulier à Karine, Valérie et Jérémie pour leur aide et leurs encouragements, de même que Mélanie et Marie-Odile pour nos séances de rédactions qui m'ont fourni de la motivation supplémentaire.

# Table des matières

Sommaire	.....	i
Remerciements	.....	iii
Table des matières	.....	iv
Liste des tableaux	.....	vi
Liste des figures	.....	vii
Glossaire	.....	viii
Liste des sigles, des symboles et des acronymes	.....	xi
Introduction	.....	1
Chapitre 1	Changements climatiques et acidification des océans.....	4
1.1	CYCLE NATUREL DU CARBONE .....	4
1.2	SITUATION GLOBALE ET PRÉDICTION .....	12
1.3	ACIDIFICATION DES OCÉANS .....	19
Chapitre 2	Puits de carbone océaniques et leurs réactions à l’acidification des océans ....	24
2.1	POMPE DE SOLUBILITÉ .....	27
2.1.1	<i>Flux de carbone</i> .....	29
2.1.2	<i>Menaces</i> .....	29
2.1.3	<i>Effet de l’acidification</i> .....	30
2.2	POMPE BIOLOGIQUE .....	31
2.2.1	<i>La contre-pompe de CaCO<sub>3</sub></i> .....	32
2.2.2	<i>Rôle des bactéries et virus</i> .....	33
2.2.3	<i>La faune marine</i> .....	34
2.2.1	<i>Flux de carbone</i> .....	35
2.2.2	<i>Menaces</i> .....	36
2.2.3	<i>Effet de l’acidification</i> .....	38
2.3	ÉCOSYSTÈMES .....	40
2.3.1	<i>Marais salés</i> .....	41
2.3.2	<i>Prairies côtières</i> .....	42
2.3.3	<i>Forêts de mangroves</i> .....	44
2.3.4	<i>Forêts de macroalgues</i> .....	46
2.3.5	<i>Récifs coralliens</i> .....	49
Chapitre 3	Analyse de la vulnérabilité des puits de carbone océaniques à l’acidification des océans .....	53

3.1	SÉLECTION DES CRITÈRES .....	53
3.2	GRILLE D'ÉVALUATION .....	58
3.3	COTE DE VULNÉRABILITÉ .....	60
3.3.1	<i>Pompe de solubilité</i> .....	61
3.3.2	<i>Pompe biologique</i> .....	61
3.3.3	<i>Marais salés</i> .....	64
3.3.4	<i>Prairies côtières</i> .....	65
3.3.5	<i>Forêts de mangroves</i> .....	66
3.3.6	<i>Forêts de macro-algues</i> .....	67
3.3.7	<i>Récifs coralliens</i> .....	69
Chapitre 4	Différentes options pour la conservation des puits de carbone océaniques .....	72
4.1	LES PUIITS DE CARBONE PRIORITAIRES À CONSERVER.....	72
4.2	MESURES DE CONSERVATION .....	74
4.2.1	<i>Aires marines protégées</i> .....	77
4.2.2	<i>Gestion intégrée</i> .....	79
4.3	ARGUMENTS ÉCONOMIQUES ET POLITIQUES .....	80
4.3.1	<i>L'analyse bénéfice-coût</i> .....	81
4.3.2	<i>Incitatifs économiques</i> .....	83
4.3.3	<i>Politiques environnementales nationales</i> .....	85
Conclusion	.....	87
Références	.....	89
Annexe 1	Bibliographie .....	97
Annexe 2	Schéma descriptif de la valeur économique totale .....	98

## Liste des tableaux

Tableau 1.1	Importance des réservoirs de carbone dans les sphères terrestres .....	5
Tableau 1.2	Description des réactions impliquées dans le cycle naturel du carbone .....	7
Tableau 1.3	Formule des processus anthropiques libérant le carbone à l'atmosphère .....	13
Tableau 1.4	Les principaux gaz à effet de serre et leur potentiel de réchauffement planétaire .....	15
Tableau 1.5	Formules à l'équilibre du système carbonate des eaux naturelles .....	20
Tableau 2.1	Description de l'importance des flux de carbone et de la durée de séquestration au sein des différents puits de carbone océaniques .....	25
Tableau 3.1	Grille d'évaluation de la vulnérabilité des puits de carbone bleu à l'acidification .....	59
Tableau 3.2	Présentation des puits de carbone bleu selon leur vulnérabilité à l'acidification des océans, avec la quantité du carbone séquestré par chaque puits, en Tg C/an60	
Tableau 4.1	Mesures de conservation applicables à chaque puits de carbone bleu .....	76



## Liste des figures

Figure 1.1	Schéma global du cycle du carbone. ....	6
Figure 1.2	Cycle du carbone organique selon l'échelle de temps.....	10
Figure 1.3	Cycle du carbone inorganique .....	11
Figure 1.4	Évolution des concentrations atmosphériques de CO <sub>2</sub> depuis 10 000 ans dans le grand graphique et depuis 1750 dans la fenêtre.....	12
Figure 1.5	Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI <sup>e</sup> siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999.....	16
Figure 1.6	Variations observées a) de la température moyenne à la surface du globe, b) du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe, selon les données recueillies par les marégraphes (en bleu) et les satellites (en rouge) et c) de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord en mars-avril. ....	18
Figure 1.7	Graphique illustrant les variations d'abondance relative des différentes espèces du système carbonate en fonction du pH.....	20
Figure 2.1	Graphique illustrant le lien entre l'augmentation de la concentration du CO <sub>2</sub> océanique et l'abaissement du pH de l'eau de mer. ....	26
Figure 2.2 :	Schéma illustrant les procédés de la pompe de solubilité et de la pompe biologique .....	28
Figure 2.3 :	Schémas illustrant les pompes de solubilité, de carbone organique et de contre-pompe de CaCO <sub>3</sub> .....	33
Figure 2.4 :	Schéma illustrant les procédés de la pompe de solubilité et de la pompe biologique. ....	36
Figure 2.5 :	Déclin de la capacité d'absorption du CO <sub>2</sub> de l'océan dans l'hémisphère Sud en raison de la stratification des eaux. ....	38
Figure A2.1	Schéma décrivant les valeurs d'usage et de non-usage applicables aux milieux naturels .....	98

## Glossaire

Acidose :	État pathologique dû à une augmentation de l'acidité dans le sang
Albédo :	Proportion du rayonnement solaire absorbé par une surface par rapport à la portion réfléchie.
Anoxie :	Condition sans oxygène
Aragonite :	Forme cristalline du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), polymorphe stable à haute température et haute pression.
Bactérioplancton :	Bactéries composant le plancton
Bivalves :	Classe de l'embranchement des mollusques, correspondant à des espèces donc la coquille est constituée de deux parties distinctes et attachées, relativement symétriques, pouvant s'ouvrir et se refermer.
<i>Business as usual</i> :	Scénario ou le statu quo est maintenu
Calcite :	Forme cristalline du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), polymorphe stable en conditions ambiantes.
Carbone bleu :	Le carbone capturé biologiquement par des organismes marins
Carbone vert :	Le carbone capturé biologiquement
Cnidaires :	Embranchement regroupant des espèces animales relativement simples, dont entres autres les méduses et les coraux.
Coccolithophores :	Ordre d'algues marines unicellulaires microscopiques et planctoniques recouvertes d'une couche de plaques de calcite nommées coccolithes.
Cote de vulnérabilité :	Indice obtenu par la multiplication de la valeur du critère d'analyse de vulnérabilité par la note attribuée à ce critère.
Critères pondérés :	Critères d'analyses se voyant attribuer différentes valeurs, selon l'importance de l'impact qu'ils peuvent avoir.
Cyanobactéries :	Embranchement de bactéries capables de réaliser de la photosynthèse
Diatomées :	Sous-embranchement de micro-algues unicellulaires planctoniques enveloppées d'un squelette externe siliceux.

Dugongs :	Espèce de mammifères marins de l'ordre des siréniens.
Échinidés :	Classe d'organismes marins dont le corps est recouvert entièrement de piquants, par exemple les oursins.
Échinodermes :	Embranchement d'animaux marins benthiques, par exemple les étoiles de mer et les oursins.
Épiphytes :	Plantes se développant en se servant d'autres plantes comme substrat
Espèce clé :	Espèce ayant un effet disproportionné sur son environnement par rapport à sa biomasse ou à sa population.
Euryèces :	Espèce dont l'intervalle de survie par rapport à un facteur environnemental est large.
Eutrophes :	Se dit d'un milieu riche en nutriments.
<i>Fitness</i> :	Valeur adaptative, c'est-à-dire la mesure de l'aptitude relative à la survie et à la reproduction d'un génotype donné.
Foraminifères :	Embranchement d'organismes protozoaires recouverts de tests de différents types et composés de différents matériaux.
Halieutique :	Relatif à l'exploitation des ressources vivantes aquatique, en particulier les poissons.
Hermatypique :	Se dit des espèces de coraux qui construisent des récifs et abritent des algues endosymbiotiques.
Horizon de saturation :	Frontière verticale où l'état de saturation de l'aragonite ou de la calcite est sous-saturé en dessous et sursaturé au-dessus.
Oligotrophe :	Se dit d'un milieu pauvre en nutriments.
Ophiuridés :	Classe d'échinodermes caractérisée par un corps discoïdal aplati duquel partent cinq bras complètement indépendants du corps. Diffèrent des étoiles de mer.
Otolithes :	Structure d'aragonite nécessaire à l'orientation des poissons
Phytoplancton :	Plancton végétal
Polyspécifique :	Propre à plusieurs espèces
Protéorhodopsin :	Pigment photosynthétique présent chez certaines bactéries marines

Ptérotopodes :	Ancien ordre de mollusques caractérisés par des appendices servant à la nage de chaque côté du corps. Aujourd'hui remplacé par les ordres <i>Thecosomata</i> et <i>Gymnosomata</i> .
Puits de carbone :	Unités physiques ou processus par lesquels le carbone est retiré de l'atmosphère.
Réservoir de carbone :	Composante de l'environnement stockant le carbone pour une période donnée
Résilience :	Capacité à se remettre d'une perturbation
Rhizomes :	Partie souterraine ou subaquatique de la tige de certaines plantes vivaces
Sclérifiants :	Se dit d'organismes sécrétant du carbonate de calcium.
Source de carbone :	Élément ou processus libérant du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.
Sténoèce :	Espèce dont l'intervalle de survie par rapport à un facteur environnemental est étroit.
<i>Thecosomata</i> :	Ordre de mollusques de la classe des gastéropodes
Thermohaline :	Se dit de ce qui a trait à la fois à la température et à la salinité
<i>Upwelling</i> :	Phénomène de la remontée des eaux profondes
<i>Shoaling</i> :	Phénomène de la remontée de l'horizon de saturation
Urochordés :	Aussi nommés tuniciers. Sous-embranchement des Chordés.
Viriplancton :	Virus composant le plancton
Zone intertidale :	Zone située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées. Aussi nommé estran.
Zone néritique :	Zone au-dessus du plateau continental.
Zooplancton :	Plancton animal
Zooxanthelles :	Algues unicellulaires photosynthétique en symbiose avec les coraux hermatypiques.

## Liste des sigles, des symboles et des acronymes

ABC :	Analyse bénéfices-coûts
AMP :	Aires marine protégées
At :	Astate, un halogène
Br :	Brome, halogène
C :	Carbone
$\text{Ca}^{2+}$ :	Ion de calcium
$\text{CaCO}_3$ :	Carbonate de calcium
$\text{CaO}$ :	Oxyde de calcium, ou chaux vive
$\text{CaSiO}_3$ :	Silicates de calcium, ou Wollastonite
CCME :	Conseil canadien des ministres de l'Environnement
CDB :	Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique
CFC :	Chlorofluorocarbures
$\text{C}_{\text{inorg}}$ :	Carbone inorganique
$\{\text{CH}_2\text{O}\}$ :	Formule brute des composés de sucre
$\text{CH}_4$ :	Méthane
Cl:	Chlore
$\text{C}_m\text{H}_n$ :	Formule brute des hydrocarbures
$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_p$ :	Formule brute pour les hydrate de carbone
$\text{C}_{\text{org}}$ :	Carbone organique
$\text{CO}_2$ :	Gaz carbonique
$\text{CO}_{2(\text{aq})}$ :	Gaz carbonique dissous dans l'eau
$\text{CO}_2\text{éq}$ :	L'équivalent $\text{CO}_2$ désigne le potentiel de réchauffement global d'un gaz à effet de serre, calculé par équivalence avec une quantité de $\text{CO}_2$ qui aurait le même potentiel de réchauffement global.
$\text{CO}_{2(\text{g})}$ :	Gaz carbonique en phase gazeuse
$\text{CO}_3^{2-}$ :	Ion carbonate
COD :	Carbone organique dissous

CID :	Carbone inorganique dissous
CITES :	Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flores sauvages menacées d'extinction
EMV:	Écosystèmes marins vulnérables
F :	Fluor, un halogène
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
gC/m <sup>2</sup> :	Gramme de carbone par mètre carré
GES :	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat
GIZC :	Gestion intégrée des zones côtières
Gt/an :	Gigatonne par an (10 <sup>9</sup> tonne ou 10 <sup>12</sup> kg)
Gt C :	Gigatonne de carbone (10 <sup>9</sup> tonne ou 10 <sup>12</sup> kg)
HCFC:	Hydrochlorofluorocarbures
HCO <sup>3-</sup> :	Ion bicarbonate
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> :	Acide carbonique
HFC :	Hydrofluorocarbures
H <sub>2</sub> N-CHR-COOH :	Formule brute pour les composés d'acides aminées, R représentant un radical organique variable
H <sub>2</sub> O :	Oxyde d'hydrogène, ou eau
<i>hν</i> :	Énergie du rayonnement solaire
I :	Iode, un halogène
ISO :	<i>International standard organisation</i>
IUCN :	Union internationale pour la Conservation de la Nature
IWC:	<i>International Whaling Commission</i>
Mmol C/ha :	Mégamole de carbone par hectare (10 <sup>6</sup> mole)
NaHCO <sub>3</sub> :	Bicarbonate de sodium
nm :	Nanomètre (10 <sup>-9</sup> mètre)
NASA :	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA :	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
N <sub>2</sub> O :	Oxyde nitreux
O <sub>2</sub> :	Oxygène

ONGI :	Organisation non gouvernementale internationale
OQLF :	Office québécois de la langue française
pCO <sub>2</sub> :	Pression partielle du gaz carbonique
PFC :	Perfluorocarbures
Pg C :	Pétagramme de carbone (10 <sup>12</sup> kg)
pK <sub>a</sub> :	Log de la constante de dissociation de l'acide, ou la valeur de pH où la concentration de l'acide est égale à la concentration de sa base conjuguée.
Ppm :	Partie par million
REDD :	Programme de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts
R-OH :	Formule brute pour les composés d'alcool, R représentant un radical organique variable
SF <sub>6</sub> :	Hexafluorure de soufre
SiO <sub>2</sub> :	Dioxyde de silicium
TC/ha/an :	Tonne de carbone par hectare par an
Tg C/an :	Téragramme de carbone par an (10 <sup>9</sup> kg)
Tg C/ha/an :	Téragramme de carbone par hectare par an
Tmol C/an :	Téramole de carbone par an (10 <sup>12</sup> mol)
Tt :	Tératonne (10 <sup>12</sup> tonne ou 10 <sup>15</sup> kg)
UNEP :	Programme des Nations Unies pour l'environnement
UVB :	Rayonnement ultraviolet dont la longueur d'onde se situe entre 315 et 280 nanomètres
UVC :	Rayonnement ultraviolet dont la longueur d'onde se situe entre 280 et 100 nanomètres
λ :	Lambda, symbole pour la longueur d'onde
Ω :	Oméga, symbole pour l'état de saturation du carbonate de calcium dans l'eau
μm :	Micromètre (10 <sup>-6</sup> mètre)

## **Introduction**

La communauté scientifique est submergée d'enjeux environnementaux suscitant des inquiétudes quant à la pérennité des écosystèmes planétaires ainsi que des sociétés humaines. L'acidification des océans est un de ces enjeux et ce phénomène prend de l'ampleur. Les causes de l'abaissement du pH de l'eau de mer sont les mêmes que celles des changements climatiques, c'est-à-dire l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre due aux activités anthropiques. L'acidification menace la survie de plusieurs espèces marines et menace, par le fait même, l'équilibre des réseaux trophiques et des écosystèmes marins. Un changement de pH influence aussi les concentrations aqueuses d'ions importants pour certains processus physico-chimiques naturels, comme la dilution du gaz carbonique atmosphérique qui est ensuite transporté par les grands courants océaniques, et ce, pendant des milliers d'années.

Parallèlement, les écosystèmes marins aptes à capter du carbone et à le stocker à court ou à long terme sont des puits de carbone encore méconnus de plusieurs, malgré l'importance du carbone qu'ils séquestrent. Nommés les puits de carbone bleu, ces écosystèmes, de même que certains processus physico-chimiques ou biologiques, sont fortement menacés par les activités anthropiques, mais également par les conséquences des changements climatiques, comme la hausse du niveau des océans. L'acidification des océans affecte aussi la santé des puits de carbone bleu, mais les effets sont encore mal connus. Pour cette raison, cet essai tente d'éclaircir le lien entre la vulnérabilité des puits de carbone océaniques et l'acidification des océans.

La majorité de la documentation utilisée est publiée par des organisations internationales, telles que le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP), le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CDB), l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN), ou encore des groupes de scientifiques, comme le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les documents produits par ces



organisations non gouvernementales internationales (ONGI) sont des synthèses d'articles scientifiques, ou encore des rapports produits à partir de leurs propres données. En dehors de ces références, plusieurs articles scientifiques ont été consultés pour atteindre les objectifs visés dans ce document. Ces articles sont pour la plupart publiés dans des périodiques réputés ou spécialisés en océanographie.

Cet essai a pour principal objectif d'identifier le ou les puits de carbone océaniques vulnérables à l'acidification des océans afin de prévoir des efforts de conservation et de restaurations appropriés à chacun d'eux. Plus spécifiquement, les objectifs sont de répertorier et décrire tous les systèmes et écosystèmes pouvant être définis en tant que puits de carbone océaniques, d'élaborer des critères d'analyse évaluant la vulnérabilité des puits de carbone bleu à l'acidification, d'analyser cette vulnérabilité, puis de discuter de la priorité des puits à conserver, de même que différentes stratégies pour y arriver.

Afin d'atteindre ces objectifs, des concepts généraux doivent être détaillés, afin d'établir les connaissances de base nécessaires à l'analyse de vulnérabilité. Tout d'abord, la compréhension du cycle du carbone est essentielle pour comprendre les échanges du carbone entre les sphères terrestres, de même que la compréhension du phénomène des changements climatiques. C'est afin de contrer ces changements climatiques qu'il est si important de comprendre, répertorier, préserver, gérer et restaurer les puits de carbone naturels. En plus, certaines conséquences des changements climatiques menacent la survie d'écosystèmes séquestrant du carbone. Parmi les conséquences du déséquilibre dans le cycle du carbone, l'acidification des océans en est une importante. La compréhension de ce phénomène est essentielle afin de comprendre par la suite de quelle manière cela affectera les écosystèmes marins et côtiers et de quelle manière cela pourrait modifier les échanges de carbone au sein de ces écosystèmes.

Ensuite, les informations à propos de chaque puits de carbone bleu à être analysé doivent être regroupées afin de souligner quels sont les éléments de ces écosystèmes ou de ces processus qui pourront être affectés par l'acidification. Cet exercice permet également de connaître l'importance du carbone séquestré par chaque puits, tout comme cela permet de souligner

quelles données sont manquantes ou ont une forte incertitude et bénéficieraient donc d'un intérêt scientifique accru.

Puis, afin de pouvoir mener une analyse de vulnérabilité, il faut sélectionner les critères d'évaluation. Ces critères sont développés en se basant sur des exemples de critères d'analyses de vulnérabilité existantes, ainsi qu'en déterminant sur quels éléments d'un puits de carbone l'acidification peut agir négativement. Ces éléments sont affectés différemment par l'acidification, c'est pourquoi une pondération est attribuée aux critères selon le niveau d'influence subis par l'acidification. Une fois les critères pondérés, une note leur est attribuée selon la force de l'impact qu'ils ont sur ces puits de carbone. Ainsi, une cote de vulnérabilité peut être obtenue pour chaque puits de carbone bleu et contribuera par la suite à la discussion sur les méthodes de protection de ces puits.

Finalement, des pistes de solution à considérer comme méthode de protection des puits de carbone naturels sont présentées en dernier chapitre de ce document. Puisque la situation actuelle des puits de carbone bleu peut varier, des méthodes de protection différentes sont présentées afin de déterminer celle étant la mieux adaptée à chaque puits.

Ainsi, ce document aidera à déterminer les effets de l'acidification des océans sur des composantes océaniques capables de freiner les causes de cette acidification. En ayant des informations plus complètes sur le statut de chacun de ces puits, les actions à entreprendre pour les conserver seront plus évidentes et pourront être mises en place rapidement.

# **Chapitre 1**

## **Changements climatiques et acidification des océans**

Les changements climatiques sont une problématique mondiale que personne ne peut ignorer. En effet, tous les pays doivent contribuer à en mitiger les conséquences, puisque c'est un phénomène global. Les frontières géopolitiques ne protègent personne de ces changements.

De nos jours, il est généralement accepté que les changements climatiques sont causés par une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), en particulier le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Afin de comprendre plus en détail le mode d'action de ces GES, il peut être intéressant d'en apprendre davantage à propos du cycle du carbone. Les échanges de carbone entre les sphères terrestres permettent de comprendre également comment un déséquilibre dans la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique peut occasionner des changements climatiques.

Parmi les conséquences de ces changements, l'acidification des océans a des impacts encore peu connus sur le cycle du carbone, mais possiblement importants. Ce premier chapitre permet ainsi d'établir la base nécessaire à l'analyse des impacts de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins et côtiers, ainsi que la capacité des océans à séquestrer le carbone.

### **1.1 Cycle naturel du carbone**

Le carbone (C) est le 14<sup>e</sup> élément le plus abondant sur Terre et est une composante de nombreuses molécules, dont plusieurs sont essentielles à la vie. En effet, la vie sur Terre ne pourrait être ce qu'elle est sans des processus tels la photosynthèse et la respiration, qui utilisent le carbone pour former les composés structurants des organismes vivants et pour créer l'énergie nécessaire au métabolisme de ceux-ci. On retrouve aussi le carbone dans toutes les sphères terrestres, qui sont la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. Chacune de ces sphères constitue un réservoir de carbone (voir tableau 1.1), où celui-ci est

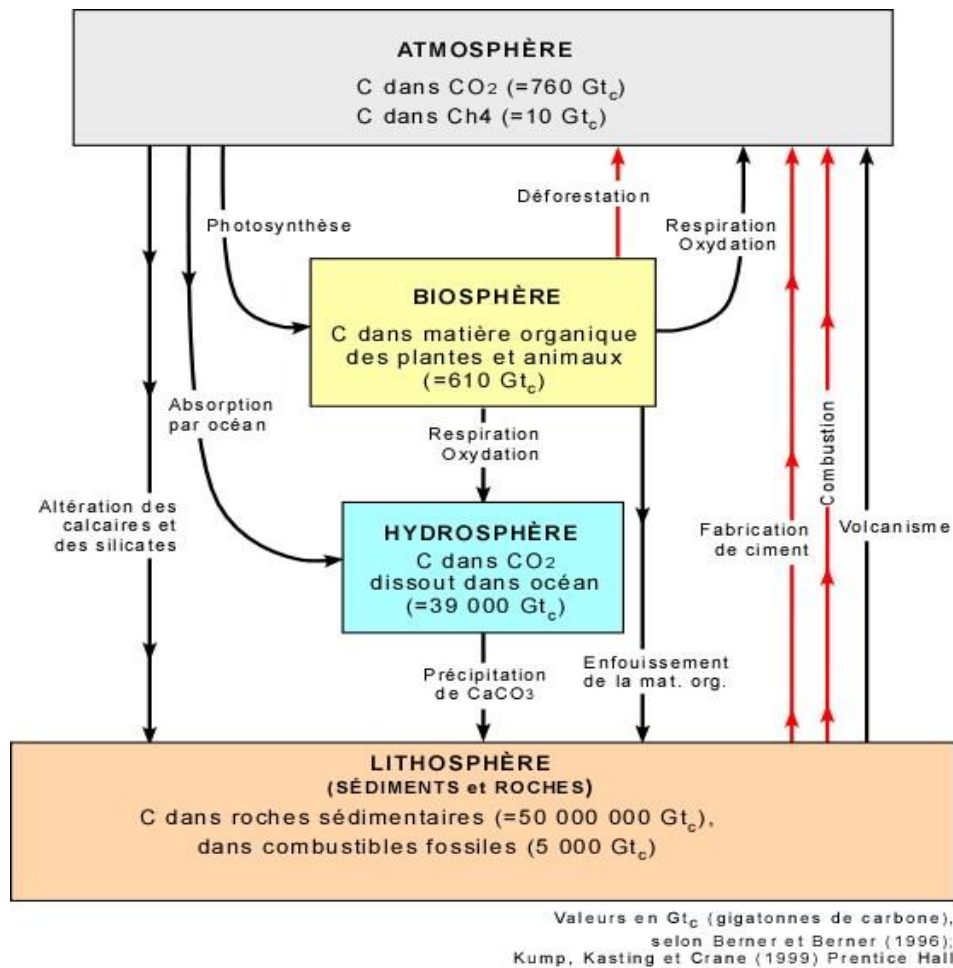
stocké sous différentes formes pour de courtes périodes, comme dans la biosphère, ou pour de longues périodes, comme dans la lithosphère (Bourque, 2010).

**Tableau 1.1 Importance des réservoirs de carbone dans les sphères terrestres**

<b>Sphère</b>	<b>Quantité de carbone stocké (en Gt de C)</b>
<b>Lithosphère</b>	50 000 000 (roches sédimentaires) et 5 000 (hydrocarbures)
<b>Hydrosphère</b>	39 000
<b>Atmosphère</b>	760 (CO <sub>2</sub> ) et 10 (CH <sub>4</sub> )
<b>Biosphère</b>	610

Inspiré de : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2

Au travers du cycle du carbone et par divers processus, les molécules carbonées sont transformées d'une forme à l'autre, transférées d'une sphère à l'autre et sans cesse recyclées grâce aux processus en boucle, créant ainsi un équilibre entre les formes de carbone (voir figure 1.1). Les processus faisant partie du cycle général du carbone sont résumés au tableau 1.2. Les transferts se déroulant sur une courte échelle de temps, c'est-à-dire moins d'un siècle, font partie du cycle court. Si le recyclage du carbone se fait sur plus d'un siècle et jusqu'à plusieurs milliers d'années, on parle alors de long cycle (Bourque, 2010).



**Figure 1.1 Schéma global du cycle du carbone.** (Les flèches en noir représentent les processus naturels tandis que les flèches en rouge représentent les processus anthropiques.)

Source : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2

**Tableau 1.2 Description des réactions impliquées dans le cycle naturel du carbone**

Direction	Processus	Formule ou transformation	Flux de carbone	Échelle de temps
<b>Lithosphère vers atmosphère</b>	Volcanisme	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	0,03 Gt/an	Cycle long
<b>Atmosphère vers lithosphère</b>	Altération carbonates et silicates	$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ $CaSiO_3 + 2 H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + SiO_2 + H_2O$	0,17 Gt/an 0,03 Gt/an	Cycle long
<b>Atmosphère vers biosphère</b>	Photosynthèse	$CO_2 + H_2O + h\nu \rightarrow \{CH_2O\} + O_2$	60 Gt	Cycle court
<b>Biosphère vers atmosphère et hydrosphère</b>	Respiration autotrophe et hétérotrophe + oxydation+ combustion+ fermentation	$\{CH_2O\} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ $\{CH_2O\} \rightarrow CO_2 + CH_4$	30 Gt	Cycle court
<b>Atmosphère vers hydrosphère</b>	Dissolution	$CO_{2(g)} \rightleftharpoons CO_{2(aq)} \rightleftharpoons HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3$ $CO_3^{2-} \rightleftharpoons HCO_3^-$	60 Gt/an	En équilibre
<b>Hydrosphère vers atmosphère</b>	Dégazage	$CO_{2(g)} \rightleftharpoons CO_{2(aq)} \rightleftharpoons HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3$ $CO_3^{2-} \rightleftharpoons HCO_3^-$	60 Gt/an	En équilibre
<b>Biosphère vers lithosphère</b>	Sédimentation (fossilisation)	Enfouissement de sédiments et fossilisation du carbone organique	0,5 Gt/an	Cycle long
<b>Hydrosphère vers lithosphère</b>	Précipitation $CaCO_3$	$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$	0,5 Gt/an	Cycle long
<b>Lithosphère vers hydrosphère</b>	Dissolution	$CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$	0,3 Gt/an	Cycle long

Inspiré de : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2 et Olivier, M.J. (2009). p. 120-121

En bref, le cycle utilise le  $CO_2$  en provenance des roches sédimentaires, mélangées dans le magma, qui est libéré dans l'atmosphère par les émanations volcaniques. Dans l'atmosphère, le gaz carbonique peut être capté par les producteurs primaires, c'est-à-dire les végétaux, qui l'utilisent pour synthétiser leur énergie à l'aide de l'énergie solaire par le biais de la photosynthèse. Ces producteurs primaires rejettent une partie de ce  $CO_2$  capté vers

l'atmosphère par respiration dite autotrophe. Ensuite, les producteurs primaires sont consommés par des consommateurs primaires tels les herbivores et les omnivores, qui peuvent aussi être consommés par des consommateurs secondaires tels les carnivores et les omnivores. Les organismes détritiques décomposent les organismes morts à chaque niveau de la chaîne trophique. Tous ces organismes, qui dépendent de la production primaire, rejettent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère par respiration dite hétérotrophe. Lors de la décomposition, une partie du carbone est sédimentée, une autre fermentée, ce qui libère du méthane, puis une autre partie est respirée. La combustion naturelle des forêts est aussi responsable de libération de CO<sub>2</sub> à l'atmosphère. Ces processus font partie du cycle court. Le méthane libéré dans l'atmosphère possède un court temps de résidence, puisqu'il y est oxydé et transformé en gaz carbonique. C'est pour cette raison que le méthane sera comptabilisé dans ce document en tant que CO<sub>2</sub>, ou CO<sub>2</sub>eq (Bourque, 2010).

Le CO<sub>2</sub> atmosphérique peut aussi être transféré à l'hydrosphère par dissolution. Selon les principes de chimie de l'eau, le carbone dissous se retrouve dans le système d'équilibre de carbonate



dont la spéciation dépend du pH. Donc, le CO<sub>2</sub> dissous peut ensuite être assimilé par les producteurs primaires océaniques, c'est-à-dire les algues telles que le phytoplancton, les macroalgues ou les zooxanthelles associées aux coraux, de même que les plantes aquatiques, pour leur photosynthèse. Il est aussi rejeté par respiration autotrophe et hétérotrophe, ce qui crée également un cycle court dans l'hydrosphère. Le carbone sous forme de bicarbonate peut aussi se lier aux atomes de calcium dissous (Ca<sup>2+</sup>) et précipiter lentement au fond de l'océan sous forme de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>). C'est lorsque le carbone précipite qu'il entre dans le cycle long (Bourque, 2010).

Le carbone est transféré dans la lithosphère par la précipitation de CaCO<sub>3</sub>, la sédimentation d'organismes marins, l'enfouissement des matières organiques, de même que l'altération des

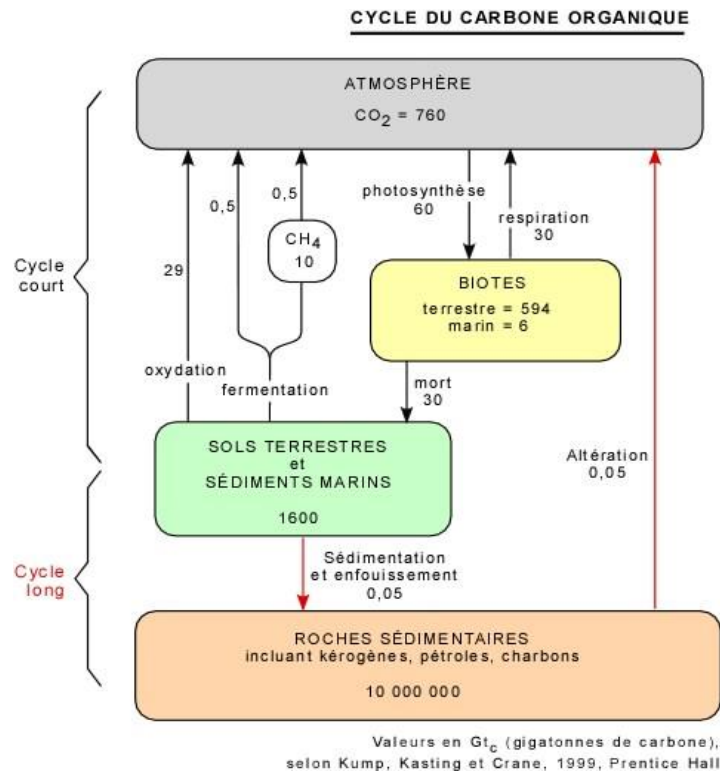
silicates et carbonates, des roches à base de carbone composant la croûte terrestre. Les roches sédimentaires sont formées par l'accumulation de ces sédiments. Les sédiments de matières organiques enfouis sont méthanisés et se transforment lentement en combustibles fossiles tels le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Pendant plusieurs millions d'années, ce carbone sera emprisonné, puis renvoyé à l'atmosphère par volcanisme ou renvoyé à l'hydrosphère par dissolution (Bourque, 2010). C'est ainsi que le carbone circule à travers les différentes sphères terrestres. La figure 1.1 représente également (par des flèches rouges) les processus anthropiques intervenant dans le cycle du carbone et créant un déséquilibre entre les processus d'échange. Ces processus seront discutés en détail à la section 1.2.

Les propriétés du carbone lui permettent de prendre de nombreuses formes et c'est pourquoi on le retrouve dans toutes les sphères terrestres. Avec ses quatre électrons de valence, l'atome de carbone peut se lier avec quatre autres atomes. Il peut également créer des liens doubles ou triples avec d'autres atomes, de même qu'il peut créer des molécules cycliques, telles les molécules aromatiques. Les différentes spéciations du carbone peuvent se diviser en deux grandes catégories, soit le carbone organique ( $C_{org}$ ) et le carbone inorganique ( $C_{inorg}$ ) ou minéral (Olivier, 2009).

Le  $C_{org}$  est défini ainsi s'il est lié à au moins un atome d'hydrogène ou à un autre carbone lié à un atome d'hydrogène. Cette structure de base peut aussi être liée à des atomes tels le carbone, l'hydrogène, l'azote, le phosphore, l'oxygène, le soufre, les halogènes (F, Cl, Br, I, At) et les métaux. Ce sont des molécules composant le vivant, créées par celui-ci, mais elles peuvent également provenir de processus non vivants. La figure 1.2 illustre le cycle du carbone organique selon l'échelle de temps des processus impliqués. Le  $C_{org}$  circule grâce aux organismes vivants par le biais de la photosynthèse et de la respiration. À leur mort, la matière organique les composant se retrouve dans le sol et les sédiments. De cette matière, une portion est retournée vers l'atmosphère par oxydation et fermentation. Cette circulation se fait sur une courte période de temps. La portion de  $C_{org}$  sédimentée et enfouie entre dans le cycle long; ce carbone reste donc stocké pour des milliers d'années dans la lithosphère sous forme de roche sédimentaire. C'est par l'altération de ces roches que le carbone est retourné de la lithosphère à l'atmosphère (Bourque, 2010).



Quelques exemples de molécules organiques bien connues sont les hydrocarbures ( $C_mH_n$ ) incluant le méthane, le pétrole, mais il y a aussi les molécules de glucides, ou hydrates de carbone ( $C_n(H_2O)_p$ ), les alcools ( $R-OH$ ), les acides aminés ( $H_2N-CHR-COOH$ ), etc., où R représente un radical organique variable (Bourque, 2010).

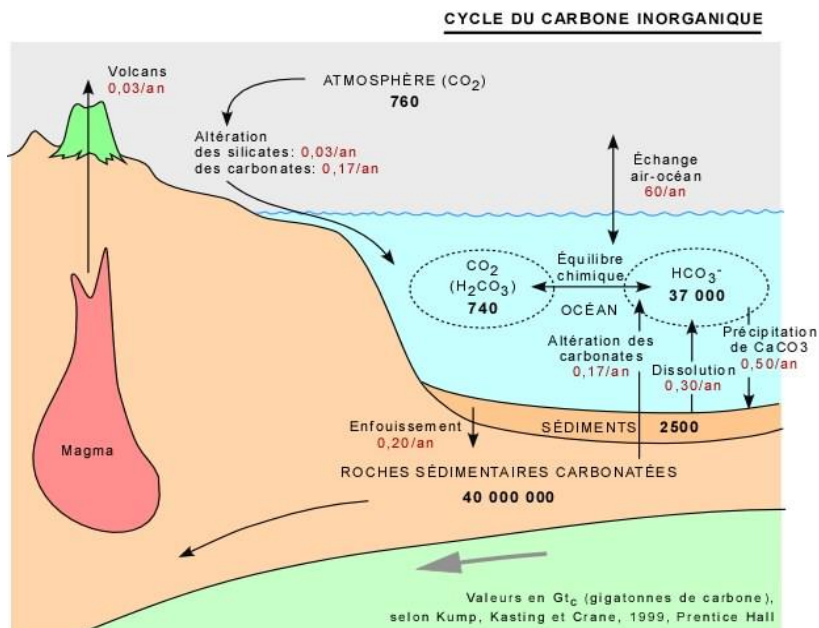


**Figure 1.2 Cycle du carbone organique selon l'échelle de temps**

Source : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2

Quant au  $C_{inorg}$ , il regroupe les molécules minéralisées, n'étant pas de composition biologique, tel le gaz carbonique ( $CO_2$ ), l'ion carbonate ( $CO_3^{2-}$ ), l'ion bicarbonate ou hydrogénocarbonate ( $HCO_3^-$ ), l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ), le carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ), le bicarbonate de sodium ( $NaHCO_3$ ), les roches sédimentaires comme la silicate et le carbonate, le diamant, le graphite ou encore des complexes organométalliques (voir figure 1.3 pour le cycle du carbone inorganique). La circulation du  $C_{inorg}$  est régie surtout par des principes chimiques tels les différences de pressions partielles de  $CO_2$  entre l'eau et l'air permettant la dissolution du gaz

ou alors le dégazage. Le gaz carbonique se déplacera vers le milieu où la pression est la plus faible. Le carbone dissous dans l'hydrosphère peut aussi provenir de l'altération des silicates et carbonates par les vents, dont le produit est transporté vers l'hydrosphère. La dissolution des sédiments marins peut aussi fournir les océans en carbone dissous. Le carbone dissous dans l'océan est en équilibre entre les formes  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Le carbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) précipite en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et les sédiments sont enfouis pour se transformer en roche sédimentaire carbonée. Le  $\text{CaCO}_3$  peut aussi avoir été métabolisé par des organismes marins et c'est à leur mort que le carbone est transporté vers les fonds marins et vers la lithosphère. La fusion des roches sédimentaires libère ensuite du  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère par volcanisme (Bourque, 2010).



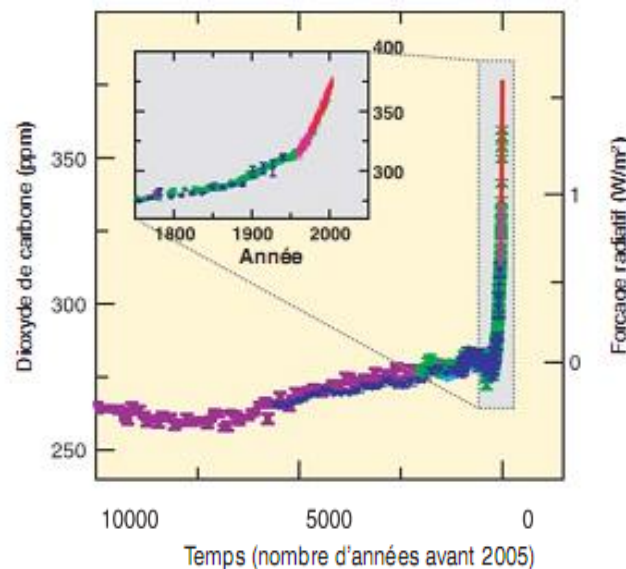
**Figure 1.3 Cycle du carbone inorganique**

Source : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2

Au travers des cycles du  $\text{C}_{\text{org}}$  et du  $\text{C}_{\text{inorg}}$ , on remarque le rôle essentiel des océans pour la circulation du carbone. En effet, près de 93 % du carbone terrestre, soit 40 Tt, est stocké ou circule dans les océans (UNEP, 2009). Ils sont donc assurément d'une grande importance pour absorber le carbone atmosphérique excédent et ainsi mitiger les changements climatiques.

## 1.2 Situation globale et prédiction

Le cycle naturel du carbone est aujourd'hui en déséquilibre, et ce, en raison du taux d'émission de  $\text{CO}_2$  atmosphérique inégalé. Les activités liées à l'industrialisation sont responsables de ces émissions supplémentaires de GES. En date du mois de mars 2013, la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  a atteint 397,34 ppm, ce qui est une augmentation substantielle et préoccupante par rapport à la concentration préindustrielle de 280 ppm (GIEC, 2007; NOAA, 2013). La figure 1.4 illustre l'évolution des concentrations de  $\text{CO}_2$  atmosphérique depuis 10 000 ans et son accélération depuis 1750.



**Figure 1.4** Évolution des concentrations atmosphériques de  $\text{CO}_2$  depuis 10 000 ans dans le grand graphique et depuis 1750 dans la fenêtre. (Chaque symbole de couleur différente représente les données provenant de différentes études, tandis que la ligne rouge illustre les données d'échantillons atmosphériques.)

Source : GIEC (2007). p. 38

Les actions anthropiques liées à l'ère industrielle utilisent le carbone stocké dans les réservoirs naturels et le libèrent dans l'atmosphère. Ainsi, la représentation du cycle du carbone actuel, tel que présenté à la figure 1.1, inclut l'influence des processus d'origines anthropiques qui affectent l'équilibre des échanges de carbone en modifiant les flux, l'échelle de temps de ces échanges et l'importance des réservoirs.

De ces processus anthropiques, les plus importants sont la combustion de combustibles fossiles, la déforestation par le feu et la fabrication de ciment. La combustion de combustibles fossiles, en augmentation presque continue depuis la révolution industrielle en tant que source énergétique, libère vers l'atmosphère le carbone ayant mis des milliers d'années à fossiliser dans la lithosphère. Actuellement, le taux d'émission par les combustibles fossiles est de 7 200 Tg C/an (UNEP, 2009). Il y a ensuite la déforestation par le feu, qui libère le carbone stocké dans les arbres et le sol vers l'atmosphère. La méthode de culture sur brûlis, encore largement pratiquée dans les pays en voie de développement, est utilisée pour fertiliser les sols pauvres des régions tropicales en incendiant des parcelles de forêt. Également, plusieurs terres destinées à l'agriculture intensive sont obtenues en incendiant de grandes superficies de forêt. Puis, un autre procédé libérant une importante quantité de carbone à l'atmosphère est la fabrication de ciment, matériau largement utilisé en aménagement urbain (Olivier, 2009). Le détail de ces réactions est décrit au tableau 1.3.

Il existe bien sûr plusieurs autres sources d'émission de GES, provenant par exemple du secteur industriel, de l'agriculture ou des sites d'enfouissement. Bien que l'importance de ces sources d'émissions soit non négligeable, elle est moindre que les trois sources majeures énumérées précédemment.

**Tableau 1.3 Formule des processus anthropiques libérant le carbone à l'atmosphère**

Processus	Description	Formule
<b>Combustion de combustibles fossiles</b>	La combustion de combustibles fossiles pour en tirer l'énergie, comme le pétrole et le gaz naturel, libère du CO <sub>2</sub> et de l'eau.	$C_nH_m + O_2 + \text{chaleur} \rightarrow CO_2 + H_2O$
<b>Déforestation par le feu</b>	La combustion de la cellulose libère du CO <sub>2</sub> et de l'eau. La combustion incomplète des matériaux végétaux et leur décomposition anaérobie libèrent du méthane et du CO <sub>2</sub> .	$Cellulose + O_2 + \text{chaleur} \rightarrow CO_2 + H_2O$ $\{CH_2O\}_n + \text{micro-organismes} \rightarrow CO_2 + CH_4$
<b>Fabrication de ciment</b>	Chauffage à température élevée de pierre à chaux, résultant en oxyde calcium et en CO <sub>2</sub> .	$CaCO_3(s) + \text{chaleur} \rightarrow CaO + CO_2$

Source : Olivier, M.J. (2009). p. 160-161

Cette augmentation de CO<sub>2</sub> contribue surtout à l'amplification du phénomène de l'effet de serre. Ce phénomène est responsable de la présence de la vie sur Terre, en permettant de maintenir une température moyenne de 15 °C à la surface terrestre, tandis que sans cela la température moyenne serait de -8 °C (Olivier, 2009).

En bref, le phénomène de l'effet de serre est la rétention de l'énergie lumineuse émise par le soleil à l'intérieur de la troposphère. Le rayonnement solaire, principalement du domaine du visible (longueur d'onde ( $\lambda$ ) de 200 nm à 500  $\mu$ m), atteint l'atmosphère et est intercepté en partie. La grande majorité des rayons UVC et une partie des UVB ( $\lambda$  de 220 à 330 nm) sont interceptés à la stratosphère par la couche d'ozone. Les longueurs d'onde qui dépassent cette barrière ( $\lambda$  supérieures à 330 nm) sont ensuite absorbées ou réfractées par la couche nuageuse, la poussière et la surface terrestre et aquatique. Les rayons qui atteignent la surface terrestre et aquatique sont absorbés et transformés en énergie thermique. La portion qui est réfléchiée par rapport à celle qui est absorbée est nommée l'effet albédo. L'importance de cet effet sur une surface donnée dépend de sa capacité à réfléchir les longueurs d'onde reçues du soleil. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 85 à 90 %, ce qui signifie que cette surface réfléchit la majorité des rayons reçus. Quant à lui, l'albédo de l'océan est de 5 à 15 %, signifiant qu'une faible portion des rayons solaires reçus est réfléchiée. En comparaison, l'albédo de l'asphalte est de 8 %. Ce type de surface absorbe la majorité des longueurs d'onde reçues et en réfléchit peu (Olivier, 2009).

En réponse au rayonnement solaire fournissant l'énergie thermique à la surface terrestre, il existe un rayonnement propre à la Terre dans le domaine de l'infrarouge ( $\lambda$  de 5 000 à 25 000 nm) équivalant à la quantité d'énergie solaire absorbée. Ce rayonnement, dégagé de la surface de la Terre, est alors émis jusqu'à l'extérieur de l'atmosphère, ou bien absorbé par la couverture nuageuse sous forme d'énergie thermique latente, ou encore capté par les molécules de gaz à effet de serre le transformant en énergie cinétique (Olivier, 2009).

Les gaz à effet de serre (GES), énumérés au tableau 1.4, sont des molécules hétéros diatomiques et triatomiques possédant des liens covalents polarisés. Cette propriété les rend

IR-actives, c'est-à-dire que l'absorption de l'énergie radiante crée des vibrations chez ces molécules. Les GES renvoient cette énergie cinétique sous forme de chaleur lors de collision ou par émission spontanée (Olivier, 2009).

Parmi ces GES, trois sont d'origine synthétique et possèdent un énorme potentiel de réchauffement planétaire, soit les HFC, les PFC puis les SF<sub>6</sub>. Les gaz désignés en tant que HFC sont des hydrofluorocarbures, des gaz fluorés étant utilisés principalement comme gaz réfrigérants en remplacement des chlorofluorocarbures (CFC) et des hydrochlorofluorocarbures (HCFC). Ces derniers sont nocifs pour la couche d'ozone et ils sont interdits depuis la mise en application du Protocole de Montréal en 1987. Quant à eux, les PFC sont des perfluorocarbures, des gaz fluorés ayant des usages multiples tels la climatisation, la réfrigération, l'extinction de feu, l'antiadhésion culinaire, l'imperméabilisation, l'antitache et l'emballage alimentaire. Le SF<sub>6</sub> est l'hexafluorure de soufre, un gaz fluoré inerte, utilisé pour de nombreuses applications, entre autres pour la métallurgie et la fabrication de semi-conducteurs (Environnement Canada, 2010a).

**Tableau 1.4 Les principaux gaz à effet de serre et leur potentiel de réchauffement planétaire**

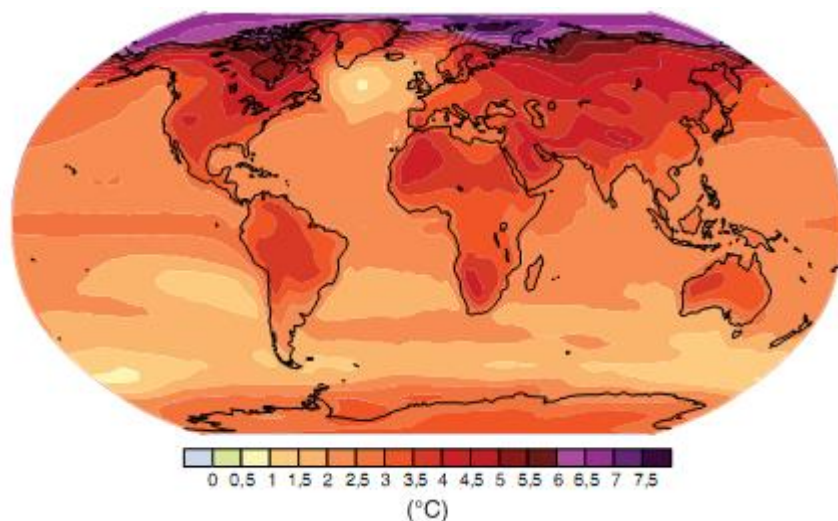
<b>Gaz à effet de serre</b>	<b>Potentiel de réchauffement planétaire pour 100 ans</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	-
<b>CO<sub>2</sub></b>	1
<b>CH<sub>4</sub></b>	21
<b>N<sub>2</sub>O</b>	310
<b>HFC</b>	De 140 à 11 700
<b>PFC</b>	De 6 500 à 9 200
<b>SF<sub>6</sub></b>	23 900

Source : Environnement Canada (2010b)

C'est ainsi qu'une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre amplifie l'effet de serre et par le fait même la température globale terrestre. Les experts du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) ont imaginé plusieurs scénarios pour les tendances futures de ces changements, certains optimistes et d'autres plus pessimistes.

Ainsi, selon les scénarios imaginés, le plus optimiste prévoit que la valeur la plus probable d'augmentation de température pour le prochain siècle serait de 1,8 °C. Les conditions de ce scénario envisagent qu'au cours du prochain siècle, aucune nouvelle politique climatique ne serait créée, qu'il y aurait un pic de la population mondiale au milieu du siècle, puis qu'il y aurait une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information (GIEC, 2007).

À l'opposé, le scénario le plus pessimiste prévoit que la valeur la plus probable d'augmentation de température pour le prochain siècle serait de 4 °C. Les conditions de ce scénario envisagent que pour cette période, aucune nouvelle politique climatique ne serait créée, qu'il y aurait une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle, ainsi que l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces, mais de sources énergétiques à forte composante fossile. Présentement, la hausse de température moyenne à la surface de la Terre est de 0,2 °C par décennie (GIEC, 2007).



**Figure 1.5** Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999

Source : GIEC (2007). p. 9

Plusieurs conséquences probables et actuelles découlant de la problématique des changements climatiques ont été identifiées. Tout d'abord, il y a le changement de température globale

terrestre tel qu'expliqué par l'amplification de l'effet de serre (voir figures 1.5 et 1.6). Un réchauffement de l'air induit également un réchauffement des eaux de surface. En sachant que l'océan est responsable de la captation du tiers des émissions de CO<sub>2</sub> anthropiques, il peut être inquiétant d'observer une élévation de température de l'eau de surface puisque la solubilité du carbone varie de manière inversement proportionnelle à la température de l'eau (Doney *et al.*, 2009).

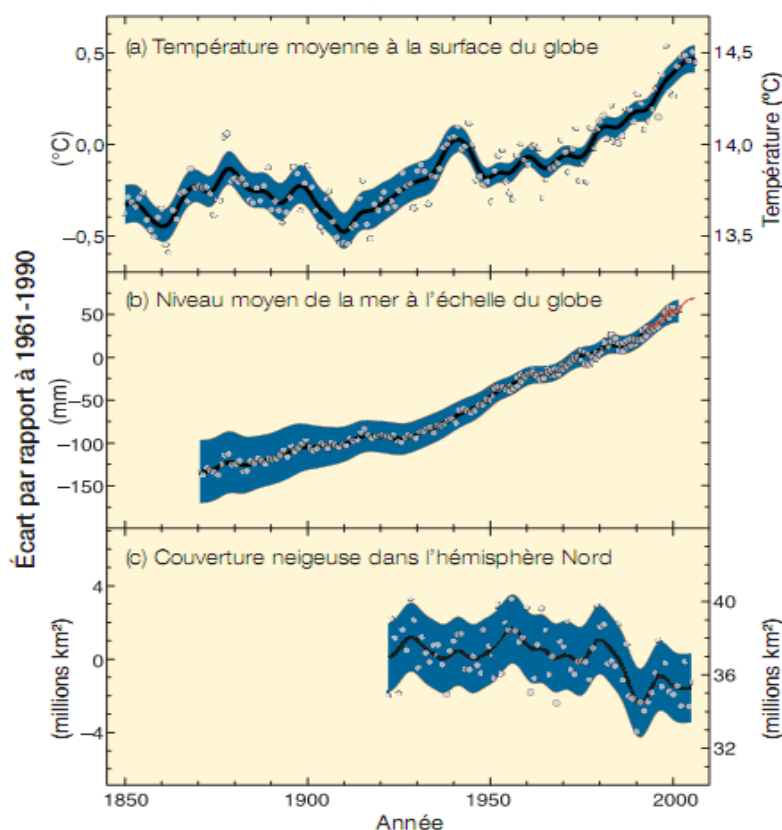
Par contre, ces changements de température ne sont pas équivalents partout sur le globe. Certains endroits se réchauffent très vite, tels les pôles, ce qui cause une fonte de la calotte polaire et du pergélisol (voir figures 1.5 et 1.6). Cette fonte libère le méthane qui était emprisonné dans le sol et la glace, et modifie également l'albédo de ces régions, contribuant à l'accélération du réchauffement (GIEC, 2008).

Ensuite, une élévation du niveau des mers est actuellement observée et les scénarios prévoient une élévation variant de 0,18 à 0,59 m pour le 21<sup>e</sup> siècle (voir figure 1.6). Ces prédictions sont basées sur le phénomène d'expansion de l'eau de surface à cause du réchauffement de cette strate. Un second phénomène responsable de la hausse du niveau des mers est la fonte des glaciers continentaux dont l'eau douce s'écoule dans l'océan. Cet apport en eau douce occasionne en plus un changement de salinité de l'eau, qui entraîne un changement de sa densité. Ce changement de densité des masses d'eau affectera les grands courants océaniques qui sont justement régulés par la salinité de l'eau (GIEC, 2008).

Le régime des vents aussi se verra modifié, puisque les courants venteux sont régulés par la température de l'air et sa pression atmosphérique. Ceci aura une influence sur le régime d'évapotranspiration et des précipitations, et donc le cycle de l'eau. Le réchauffement global de l'air et de l'eau de surface sont aussi en cause, en plus de la modification de la circulation océanique. On remarque déjà que les patrons de précipitation sont modifiés, étant en cause dans le nombre croissant d'inondations et de sécheresses, incluant l'avancée des déserts (GIEC, 2008).



Ces changements dans le cycle hydrologique et dans le régime des vents peuvent expliquer l'intensification et l'augmentation de la fréquence des épisodes climatiques extrêmes à prévoir. Selon les experts, « *il est probable que les futurs cyclones tropicaux s'intensifieront, avec une accélération des vitesses de pointe des vents et un accroissement des précipitations* » (GIEC, 2008, p. 35). Déjà, le nombre de catastrophes naturelles attribuables au climat a été multiplié par 2,4 depuis 1970 (GIEC, 2008).



**Figure 1.6** Variations observées a) de la température moyenne à la surface du globe, b) du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe, selon les données recueillies par les marégraphes (en bleu) et les satellites (en rouge) et c) de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord en mars-avril. (Tous les écarts sont calculés par rapport aux moyennes pour la période 1961-1990. Les courbes lissées = moyennes décennales. Les cercles = valeurs annuelles. Les zones ombrées = intervalles d'incertitude estimés à partir d'une analyse poussée des incertitudes connues (a et b) et à partir des séries chronologiques.)

Source : GIEC (2007). p. 3

Du point de vue biologique, un changement climatique entraîne des difficultés pour certaines espèces, en particulier les espèces spécialistes, dites sténoèces. Celles-ci occupent des niches écologiques aux limites étroites. Quant à elles, les espèces généralistes, dites euryèces, ont une plus grande capacité d'adaptation aux changements. Un exemple de conséquence des changements climatiques pour des espèces sténoèces est un récent asynchronisme entre la présence d'une espèce à un lieu donné et le moment où les ressources sont disponibles. Ce phénomène cause des effondrements de populations et même parfois, leur extinction (Parmesan, 2006).

Un autre exemple bien connu des conséquences des changements climatiques sur des organismes marins est le blanchiment des coraux. Un réchauffement des eaux de surface, milieu où se retrouve la majorité des récifs coralliens, peut induire l'expulsion par les coraux de leurs symbiotes, les algues zooxanthelles. Dans le cas où le stress hyperthermique est de courte durée, les algues recoloniseront les coraux, qui auront tout de même été affaiblis par l'absence de leur symbiote. Mais si le stress se prolonge, les coraux mourront après un certain temps, privés de leur source d'énergie (Hughes *et al.*, 2003).

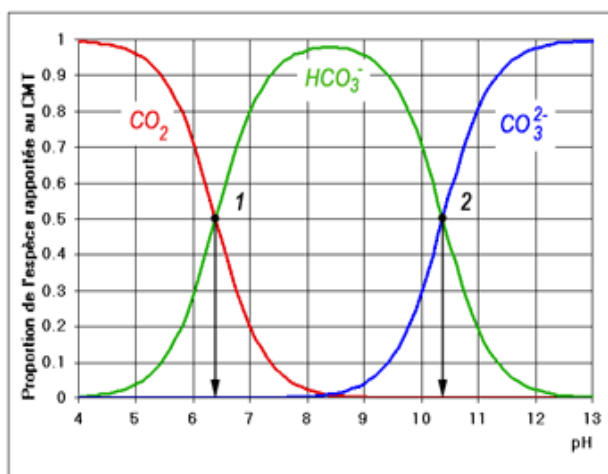
Les changements climatiques affectent donc le climat, la biodiversité, mais aussi les sociétés humaines, qui dépendent des biens et services environnementaux ou sont vulnérables aux conditions environnementales les entourant.

### **1.3 Acidification des océans**

Une autre conséquence des changements climatiques est l'acidification des océans. Ce phénomène s'explique par un débalancement entre les pressions partielles du CO<sub>2</sub> atmosphérique et du carbone dissous dans l'océan.

Tel que mentionné dans la section 1.1, les océans ont la capacité de capter le CO<sub>2</sub> atmosphérique et agissent comme milieu tampon. Cette propriété des couches supérieures de l'hydrosphère, jusqu'à 100 m de profondeur, est possible grâce au système carbonate des eaux naturelles, et donc, de l'océan. Le carbone inorganique dissous prend la forme d'ions dissous

tels que des ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), ou d'acide carbonique ( $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  ou  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). La concentration de ces différentes formes de carbone inorganique est en équilibre selon le pH de l'eau. La figure 1.7 illustre la proportion de chacune de ces spéciations en fonction du pH. Le pH de l'eau de mer varie entre 8,1 et 8,4, avec une moyenne de 8,21. Ainsi, on retrouve la majorité, soit 90 %, du carbone dans l'océan sous forme d'ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Doney *et al.*, 2009). Le détail des interactions à l'équilibre du système carbonate est présenté au tableau 1.5, où  $\text{pK}_a$  représente le log de la constante de dissociation de l'acide, ou encore la valeur de pH où la concentration de l'acide (1 :  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , 2 :  $\text{HCO}_3^-$ ) est égale à la concentration de sa base conjuguée (1 :  $\text{HCO}_3^-$ , 2 :  $\text{CO}_3^{2-}$ ).



**Figure 1.7** Graphique illustrant les variations d'abondance relative des différentes espèces du système carbonate en fonction du pH

Source : AquaBase.org (2011)

**Tableau 1.5** Formules à l'équilibre du système carbonate des eaux naturelles

Processus/ $\text{pK}_a$	Formules de l'équilibre des espèces du système carbonate
Dissolution si $\text{pCO}_{2\text{atm}} > \text{pCO}_{2\text{eau}}$ Dégazage si $\text{pCO}_{2\text{atm}} < \text{pCO}_{2\text{eau}}$	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \text{ ou } \text{CO}_{2(\text{aq})}$
$\text{pK}_{a1} = 6,33$	$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
$\text{pK}_{a2} = 10,33$	$\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

Inspiré de: Olivier, M.J. (2009). p. 22

Il est nécessaire de savoir comment interagissent les espèces du système carbonate dans l'océan afin de comprendre les conséquences de l'acidification sur la séquestration du carbone

par les océans et les écosystèmes marins. Les variations du pH de l'eau de mer apportent non seulement des modifications à la capacité d'absorption du gaz carbonique atmosphérique par les océans, mais modifient également la disponibilité de ressources comme la calcite et l'aragonite pour certaines espèces marines. D'autres conséquences potentielles aux variations de pH océanique pour les organismes marins et par rapport à l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique pourraient être expliquées par le détail du fonctionnement du système carbonate océanique. Le tableau 1.6 présente les formules expliquant les interactions de ce système.

**Tableau 1.6 Formules décrivant les interactions du système carbonate lors de l'acidification des eaux**

Interactions du système carbonate	Numéro de formule
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Formule 1.2
$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons \text{CaCO}_3$	Formule 1.3
$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	Formule 1.4
$\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{HCO}_3^-$	Formule 1.5
$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Formule 1.6

Inspiré de : Bourque, P.A. (2010). section 3.4.2

La liaison de l'ion bicarbonate à un ion calcium forme le carbonate de calcium qui, selon sa forme de cristallisation, devient soit de la calcite ou de l'aragonite. Ce précipité de carbonate de calcium abiotique sédimente lentement vers les fonds océaniques. Toutefois, cette production de CaCO<sub>3</sub> peut également se faire par processus biotique. Les organismes sclérifiants, qui utilisent l'aragonite ou la calcite pour la composition de leur matériel structurant, sont entre autres des algues calcaires comme des diatomées et des radiolaires, des coraux, des éponges, des mollusques ou encore des crustacés. Ce carbonate de calcium biotique est transféré à la lithosphère lors de la mort et la sédimentation de ces organismes. Il est à noter que la formation de carbonate de calcium génère du CO<sub>2</sub> dissous (voir formule 1.2 au tableau 1.6) (Bourque, 2010).

Le taux de calcification par ces organismes sclérifiants dépend de l'état de saturation ( $\Omega$ ) du  $\text{CaCO}_3$ . L'horizon de saturation est fonction de la profondeur, étant donné que l'état de saturation est fonction de la température et de la pression. Au-dessus de cette frontière verticale, l'aragonite et la calcite sont sursaturées ( $\Omega > 1$ ), ce qui favorise la calcification, et en dessous de cet horizon, l'état est sous-saturé ( $\Omega < 1$ ), rendant l'eau corrosive (CDB, 2010). Le carbonate de calcium est à un état saturé lorsque sa concentration est à l'équilibre avec la concentration des ions (voir formule 1.3 au tableau 1.6). Une sous-saturation diminue la disponibilité du carbonate de calcium pour les organismes qui en dépendent et par le fait même diminue leur taux de calcification (Orr *et al.*, 2005). Cette diminution du taux de calcification peut avoir des effets sur les communautés marines, allant jusqu'à affecter la chaîne trophique s'il y a une baisse de productivité primaire (Kleypas *et al.*, 1999a). Pourtant, c'est ce qui est en train de se produire avec l'acidification des océans.

L'augmentation de la pression partielle du  $\text{CO}_2$  atmosphérique induit une augmentation du  $\text{CO}_2$  dissous dans l'océan, augmentant ainsi la concentration d'ions hydrogènes dissous, et donc un abaissement du pH (voir formule 1.4 au tableau 1.6). Cette diminution de pH rend l'eau agressive, c'est-à-dire corrosive par rapport aux matériaux carbonates, car elle entraîne la dissolution du carbonate de calcium. Une addition du  $\text{CO}_2$  dissous diminue la concentration d'ions carbonates, qui se transforme plutôt en ions bicarbonates afin de tamponner le pH de l'eau (voir formule 1.5 au tableau 1.6). Une diminution de la concentration de carbonate entraîne un déséquilibre avec la concentration de carbonate de calcium, qui sera dissous pour augmenter la concentration d'ions carbonates, abaissant ainsi son état de saturation ( $\Omega$ ) (voir formule 1.6 au tableau 1.6). Cette réaction est encore plus importante en eau froide, où le  $\text{CO}_2$  se dissout plus facilement (Orr *et al.*, 2005).

Les changements climatiques causent un réchauffement de l'eau de surface et diminuent ainsi la capacité de dissolution du carbone atmosphérique. Cependant, cette diminution n'est pas suffisante pour arrêter l'acidification. Depuis la période préindustrielle, un abaissement de 0,02 unité de pH par décennie a été noté, situant à présent la moyenne du pH océanique à 8,10 plutôt que 8,21 (Doney *et al.*, 2009). Selon le scénario de *business as usual* imaginé par le GIEC (2007), qui prédit que la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique atteindra 800 ppm à la

fin de ce siècle, le pH de l'océan sera abaissé encore de 0,3 à 0,4 unité. Les conditions de ce scénario envisagent un taux d'émission de GES maintenu stable, sans nouvelle politique climatique créée et sans changement significatif des sociétés humaines

Toutefois, cette capacité de tamponnage par l'hydrosphère a ses limites, et la capacité de l'océan à capter le CO<sub>2</sub> anthropique atmosphérique qui, jusqu'à maintenant, a modéré l'ampleur des changements climatiques pourrait éventuellement être amoindrie. Étant donné les effets de l'acidification sur les organismes marins et les écosystèmes, dont certains ont aussi la capacité de capter et stocker le carbone en tant que puits de carbone océaniques, il est intrigant de savoir si cette acidification aura également un effet sur leur pouvoir de séquestration du carbone.

## **Chapitre 2**

### **Puits de carbone océaniques et leurs réactions à l'acidification des océans**

Les puits de carbone sont des unités physiques ou des processus par lesquels le carbone est retiré de l'atmosphère. Les puits de carbone mentionnés dans ce document sont des processus ou des écosystèmes marins dont le flux de carbone net s'oriente vers un réservoir, c'est-à-dire une composante de l'environnement stockant le carbone pour une période donnée, comme les sédiments ou les matériaux structurant les organismes vivants (ISO, 2006).

Lorsqu'il est mentionné des puits de carbone vert, cela désigne le processus de photosynthèse par lequel les producteurs primaires retirent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, mais désigne également de façon plus générale la composante effectuant la photosynthèse, de l'organisme à l'écosystème. Le terme carbone vert englobe tout le carbone capturé biologiquement. Cependant, la majeure partie de ce carbone, soit 55 %, devrait être identifiée en tant que carbone bleu, c'est-à-dire tout le carbone capturé par les organismes marins. En effet, les puits de carbone océaniques sont parmi les plus efficaces de la Terre. C'est pourquoi la gestion de ces puits devient un enjeu important pour les pays côtiers qui n'incluent pas encore le carbone bleu dans leur inventaire national de GES, possiblement par manque de connaissance sur ces puits (UNEP, 2009).

Ce carbone bleu est stocké dans les sédiments des écosystèmes tels les forêts de mangrove, les marais d'eau salée et les prairies côtières, ceux-ci étant les plus efficaces pour séquestrer des quantités importantes de carbone. En plus, l'échelle de temps pendant laquelle le carbone est stocké dans ces sédiments est de l'ordre de millénaires, plutôt que de décennies ou de siècles qui s'appliquent plutôt pour des puits de carbone vert (UNEP, 2009).

Par contre, les puits de carbone océaniques ne se limitent pas seulement à trois écosystèmes côtiers. Les océans sont responsables du captage d'environ le tiers de tout le carbone

anthropique émis depuis l'ère industrielle. Il existe des processus retirant de grandes quantités de carbone de l'atmosphère et le transférant vers les fonds marins à long terme, tels que la pompe de solubilité et la pompe biologique. Également, des écosystèmes côtiers peuvent capturer du carbone à moyen ou long terme, tels que les forêts de mangroves, les marais d'eau salée, les prairies côtières, les forêts de macroalgues, les estuaires, les marges ou plateaux côtiers et les récifs coralliens. Tous ces puits sont présentés au tableau 2.1, où les données respectives de stockage global de carbone sont regroupées, de même que l'échelle de temps de cette séquestration.

**Tableau 2.1 Description de l'importance des flux de carbone et de la durée de séquestration au sein des différents puits de carbone océaniques.** (Les données non disponibles ont été identifiées en tant que nd.)

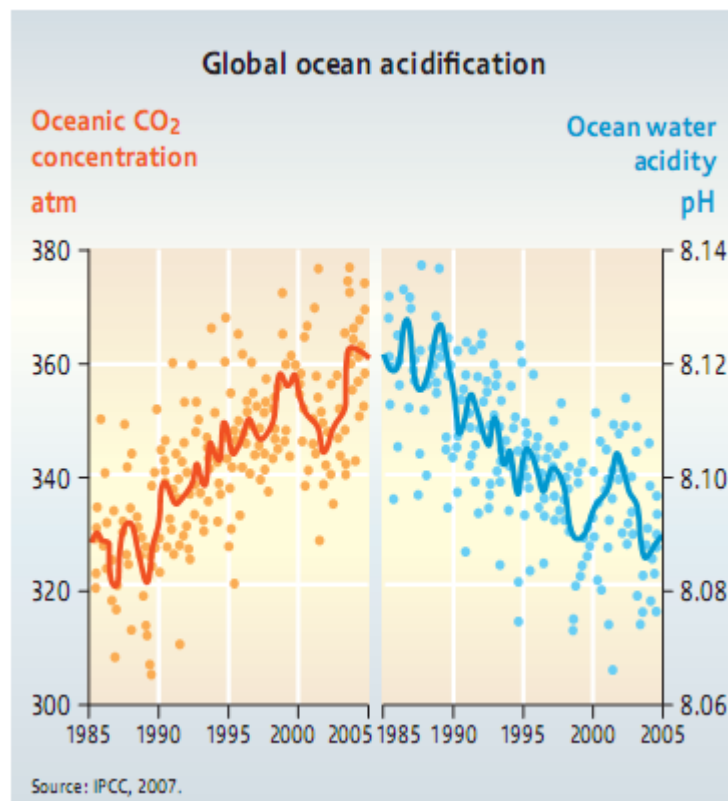
Puits de carbone	Stockage global	Échelle de temps
<b>Pompe de solubilité</b>	2,0 ± 0,7 Pg C/an (en 2000)	Longue
<b>Pompe biologique</b>	0,5 Pg C/an	Longue
<b>Marais salés</b>	60,4 à 70 Tg C/an	Longue
<b>Prairies côtière</b>	27,4 à 44 Tg C/an	Longue
<b>Forêts de mangroves</b>	17 à 23 Tg C/an	Longue
<b>Forêts de macro-algues</b>	15 à 39 Tg C /an	Courte
<b>Estuaires</b>	81 Tg C/an	nd
<b>Plateaux continentaux</b>	45,2 Tg C/an	nd
<b>Récifs coralliens</b>	-50 Tg C/an	Longue

Source : IUCN (2009). p. 33 et p. 43; UNEP (2009). p. 39; CDB (2010). p.13

Ces puits de carbone ont été que récemment considérés par la communauté internationale pour être intégrés dans les processus de gestion des changements climatiques. Ce carbone séquestré pourra par exemple être comptabilisé dans les inventaires de GES nationaux ou encore être intégrés dans les marchés du carbone existants et futurs. La raison de cet intérêt tardif n'est pas connue. La prise en charge de ces puits est d'autant plus pertinente puisqu'ils sont parmi les écosystèmes les plus menacés. Leur taux de disparition est très élevé en raison des diverses menaces d'origine anthropique et provenant des changements climatiques (IUCN, 2009). La perte actuelle des puits de carbone bleu est estimée en moyenne de 2 à 7 %, et la majorité de ces écosystèmes pourraient être perdus d'ici à dans une vingtaine d'années si rien n'est mis en



œuvre pour les protéger. Cette perte est comparable à près de quatre fois la perte des forêts tropicales pluviales (UNEP, 2009).



**Figure 2.1** Graphique illustrant le lien entre l'augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> océanique et l'abaissement du pH de l'eau de mer.  
Source : UNEP (2009). p. 32

Parmi les nombreuses menaces pesant sur ces puits de carbone océaniques, une sera explorée plus en détail dans ce présent chapitre : l'acidification des océans. Celle-ci est une autre conséquence, tout comme les changements climatiques, de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique qui, comme à la figure 2.1, augmente la concentration du CO<sub>2</sub> océanique dissous. Les conséquences de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins et les composantes environnementales sont encore peu connues. Dans le cas où ce phénomène aurait un impact sur la capacité des océans à capturer le carbone atmosphérique, il faudrait en connaître l'ampleur et le mode d'action, et ce, afin d'envisager des mesures pour contrer cet impact.

Ce chapitre répertorie, décrit et quantifie le flux de carbone pour chacun des puits de carbone mentionnés ci-dessus (tableau 2.1), identifie les menaces auxquelles chaque puits est soumis et décrit plus particulièrement les effets de l'acidification des océans sur ces puits.

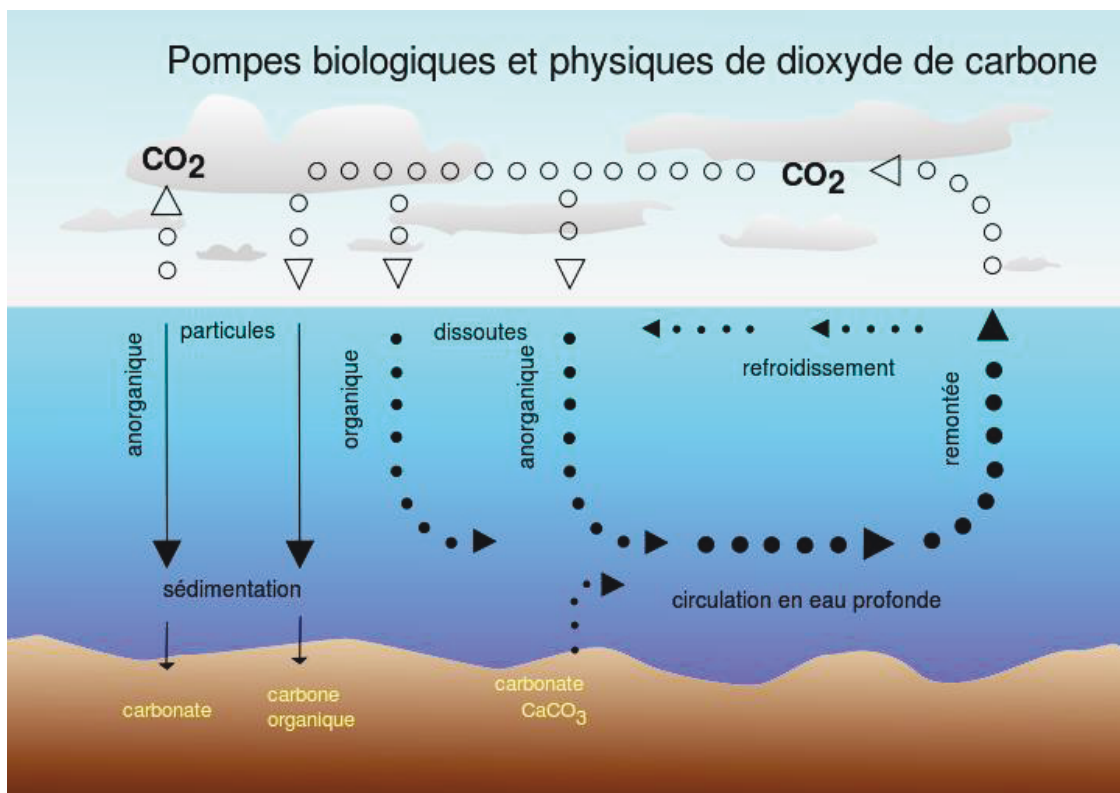
## **2.1 Pompe de solubilité**

L'échange du gaz carbonique entre l'interface eau-air est régit selon la différence de pression partielle du gaz ( $p\text{CO}_2$ ). Ainsi, lorsque la  $p\text{CO}_2$  de l'eau est plus faible que celle de l'air, le  $\text{CO}_2$  est transféré de l'atmosphère vers l'hydrosphère par dissolution; l'inverse induit un dégazage de l'hydrosphère vers l'atmosphère. Ces échanges s'effectuent afin de rétablir l'équilibre entre les deux milieux (CDB, 2010).

La quantité de carbone qui se dissout dans l'eau est fonction de la température, la salinité, l'alcalinité totale, puis de la production primaire des organismes marins. Ces facteurs influencent la  $p\text{CO}_2$  de l'eau. La quantité de  $\text{CO}_2$  dissous est donc plus importante en eau froide, en milieu alcalin et où la productivité primaire et la salinité sont élevées (UNEP, 2009).

Le CID dans les eaux de surface océaniques est transporté horizontalement et verticalement par les courants océaniques. Ces grands courants sont formés par les différences de masses d'eau, dont la densité dépend de la température et de la salinité. Ainsi, à de hautes latitudes, dans l'océan Antarctique et au nord de l'océan Atlantique, où la concentration de  $\text{CO}_2$  dissous est élevée, les eaux denses s'enfoncent vers les fonds marins. Ces courants entraînent lentement le CID par le biais de la circulation thermohaline, aussi appelée la grande courroie océanique. Ces masses d'eau circulent en profondeur pendant deux ou trois milles avant de remonter, grâce aux mouvements des vents et la topographie, dans les océans Indien et Pacifique, pour retourner le  $\text{CO}_2$  à l'atmosphère. Ce mécanisme qu'est la pompe de solubilité retire donc temporairement, mais à longue échelle de temps, une importante quantité de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, contribuant ainsi à ralentir les changements climatiques (UNEP, 2009; CDB, 2010).

La figure 2.2 illustre la combinaison de la pompe de solubilité ainsi que la pompe biologique, traité en section 2.2. Le cycle de circulation de l'eau contenant le CO<sub>2</sub> inorganique dissous est attribuable à la pompe de solubilité, tandis que la sédimentation et la circulation du carbone organique sont dues à la pompe biologique. Le carbonate peut quant à lui être sédimenté par le processus de la pompe de solubilité ou par la pompe biologique. Les deux mécanismes réunis permettent aux océans d'absorber environ 22 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> atmosphérique par jour, la pompe de solubilité étant responsable d'environ 20 % de cette séquestration (CDB, 2010).



**Figure 2.2 : Schéma illustrant les procédés de la pompe de solubilité et de la pompe biologique**

Tiré de : Grobe, H. (2006)

### 2.1.1 Flux de carbone

Les études de Lee *et al.* (2003) et de Sabine *et al.* (2004) estiment respectivement une accumulation par les océans de  $112 \pm 17$  pétagramme de carbone (Pg C) depuis le début de l'ère industrielle et  $118 \pm 19$  Pg C entre 1800 et 1994, soit 29 % du CO<sub>2</sub> d'origine anthropique. À partir des données d'absorption annuelle de  $2,2 \pm 0,4$  Pg C/an entre 1990 et 1999, Canadell *et al.* (2007) ont estimé une absorption de 24 % du CO<sub>2</sub> anthropique de 2000 à 2006 pour l'ensemble des océans (CDB, 2010).

D'autres données rapportées par Takahashi *et al.* (2009), basées sur 3 millions de mesures de pCO<sub>2</sub> d'eaux de surface prises entre 1970 et 2007, ont permis de calculer une moyenne annuelle du flux d'absorption nette de CO<sub>2</sub> actuel de  $-1,4 \pm 0,7$  Pg C/an pour tous les océans. Également, le flux d'absorption totale est calculé, en incluant le CO<sub>2</sub> anthropique et le flux préindustriel de  $0,4 \pm 0,2$  Pg C/an, à  $-2,0 \pm 0,7$  Pg C/an en 2000. Les données négatives indiquent une absorption nette de CO<sub>2</sub> par les océans (CDB, 2010).

### 2.1.2 Menaces

L'océan, en plus d'absorber une partie du CO<sub>2</sub> atmosphérique, absorbe également une fraction de la chaleur excédentaire. Ainsi, l'augmentation de la température terrestre globale entraîne aussi une augmentation des températures de surface des océans. Étant donné que la solubilité du CO<sub>2</sub> est plus importante en eaux froides, le réchauffement des océans menace d'altérer cette capacité des océans à agir en tant que milieu tampon par la dissolution du carbone atmosphérique (UNEP, 2009).

La salinité de l'eau est également affectée par l'augmentation des températures globales terrestres, qui provoquent la fonte des glaces continentales, créant un apport en eau douce important vers l'océan. La salinité globale de l'eau de mer est donc abaissée, tout comme la solubilité du CO<sub>2</sub>, étant fonction de la salinité (CDB, 2010).

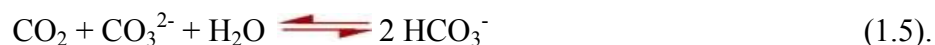
Ce sont les eaux denses, donc froides et salées, qui coulent et qui entraînent le CID vers les fonds océaniques. Toutefois, l'augmentation de la température des eaux de surface, combiné à l'abaissement de la salinité, renforce la stratification de la colonne d'eau et limite le mouvement vertical des masses d'eau, réduisant donc l'efficacité de la pompe de solubilité. Selon la majorité des modèles, la circulation thermohaline est déjà en déclin et pourrait même s'arrêter complètement, compromettant la redistribution de la chaleur, des nutriments puis du CID (Bourque, 2010).

L'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans peut donc être compromise par les variations de paramètres environnementaux affectant la solubilité du gaz carbonique. La diminution du puits de carbone de solubilité est déjà quantifiable dans certaines régions, comme dans l'océan Austral, où une diminution d'accumulation de 0,8 Pg C/an entre 1981 et 2004 a été observée (Le Quéré *et al.*, 2007). Une diminution rapide de l'effet tampon a aussi été observée dans la mer du Nord (CDB, 2010).

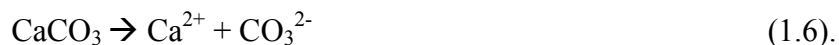
### 2.1.3 Effet de l'acidification

Il est à prévoir que l'effet tampon des océans s'épuise avec l'augmentation de l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique par les océans, et donc, de l'acidification. La solubilité du carbone à la surface des océans dépend de l'alcalinité totale de ces eaux, et donc du système carbonate, qui permet aux océans d'absorber plus de carbone sans pour autant modifier significativement le pH de l'eau de mer. Cependant, cet effet tampon sera réduit par une augmentation du CO<sub>2</sub> dissous, qui diminue l'alcalinité totale et augmentera la pCO<sub>2</sub> de l'eau de surface, réduisant ainsi la capacité des océans à absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique.

L'acidification de l'eau de surface des océans occasionne une diminution des ions carbonates pour une augmentation des ions bicarbonates, puisque :



Afin de contrer cette diminution de  $\text{CO}_3^{2-}$  et de maintenir un équilibre dans le système carbonate, le carbonate de calcium des minéraux tels l'aragonite et la calcite sera dissous, puisque :



Cette dissolution a pour effet de réduire l'état de saturation du  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega$ ) et d'élever l'horizon de saturation. La solubilité du  $\text{CaCO}_3$  augmente avec la profondeur en fonction de la pression et de la température, ce qui définit la frontière verticale ( $\Omega=1$ ) où il y a sous-saturation en dessous ( $\Omega<1$ ), qui rend le  $\text{CaCO}_3$  facilement soluble, et une supersaturation ( $\Omega>1$ ) au-dessus, qui permet la formation de minéraux de carbonate. Le rééquilibrage dans la concentration du  $\text{CO}_3^{2-}$ , occasionné par l'acidification, est donc responsable de la remontée de cet horizon de saturation, phénomène nommé *shoaling*. L'élévation de l'horizon de saturation réduit non seulement l'habitat disponible aux organismes calcifiants, mais réduit également le volume d'eau à la surface des océans pouvant absorber le  $\text{CO}_2$  atmosphérique anthropique (CDB, 2010). Ainsi, la remontée de l'horizon de saturation, attribuable à l'acidification de l'eau de mer, réduit la capacité des océans à dissoudre le  $\text{CO}_2$  atmosphérique, ce qui a pour conséquence de diminuer l'efficacité de la pompe de solubilité, le puits de carbone bleu le plus important en terme de carbone séquestré. Bien entendu, ce n'est pas le seul puits de carbone bleu dont l'efficacité sera affectée par cette acidification. Le second puits de carbone bleu le plus important, la pompe biologique, est constitué d'éléments assez vulnérables à un abaissement de pH.

## 2.2 Pompe biologique

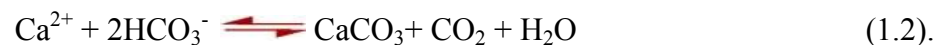
On fait généralement référence à une pompe biologique, ou pompe de carbone organique, lorsque le carbone est retiré de l'atmosphère via la photosynthèse effectuée par les producteurs primaires océaniques, c'est-à-dire le phytoplancton. Ces végétaux planctoniques utilisent le carbone inorganique dissous et les nutriments pour leur croissance et leur métabolisme, ce qui transfère le carbone sous forme organique, comptant pour environ 50 % de la matière

organique produite sur la Terre. Une portion de ce carbone est retournée à l'hydrosphère puis à l'atmosphère par respiration et dégazage, mais la principale portion du carbone est consommée par la faune marine, le phytoplancton étant la base du réseau trophique océanique.

Ces organismes sont situés en zone photique afin d'avoir accès à la lumière nécessaire à leur photosynthèse. Ils sont transportés verticalement en zone aphotique par le cycle nutritionnel du zooplancton, qui consomme le phytoplancton en surface durant la nuit, puis retourne en profondeur le jour, afin d'éviter ses prédateurs. Le zooplancton qui meurt, ainsi que ses excréments, coule vers les fonds océaniques, contribuant ainsi à la neige océanique : c'est-à-dire tous les détritiques organiques coulant vers les fonds marins, où ils sont soit sédimentés, soit reminéralisés par les bactéries pour remonter en surface par les mouvements d'*upwelling*. C'est donc principalement par ces organismes que le carbone est transféré des eaux de surface vers les couches inférieures océaniques puis les sédiments marins, comme illustré aux figures 2.3 et 2.4. Le captage du CO<sub>2</sub> dissous en surface par photosynthèse diminue la pCO<sub>2</sub> de l'eau et élève le pH, créant ainsi des conditions favorables de captage de CO<sub>2</sub> atmosphérique par les océans.

### 2.2.1 La contre-pompe de CaCO<sub>3</sub>

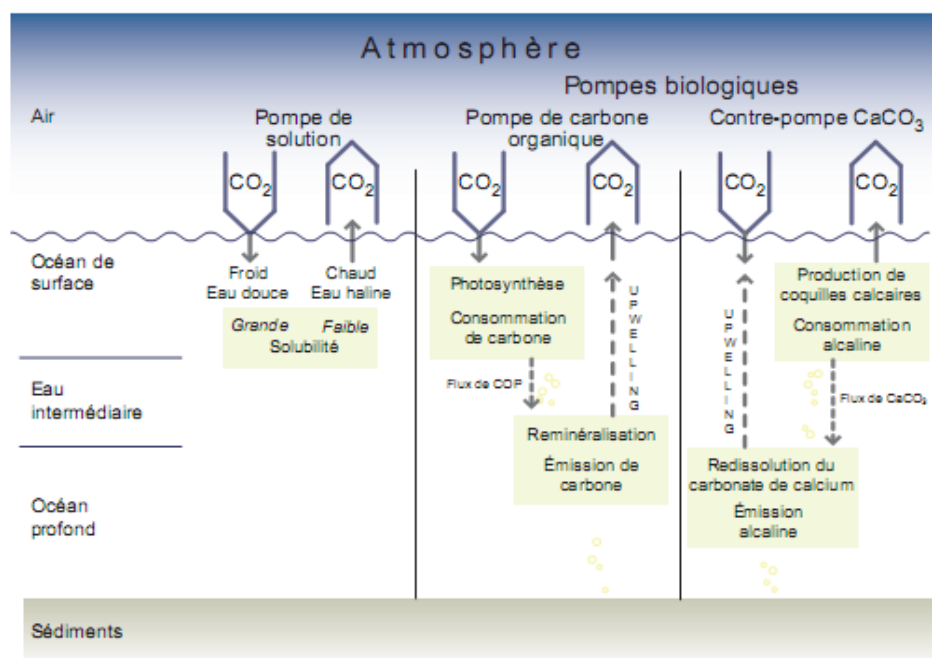
Un contre balancement à l'enlèvement de carbone par la pompe de carbone organique est la contre-pompe de CaCO<sub>3</sub>. La formation de carbonate de calcium libère du CO<sub>2</sub>, tel que dans la formule 1.2 :



Ce processus se fait en surface, où l'état de l'aragonite et de la calcite est sursaturé, permettant un taux de calcification net positif. Les organismes calcifiants parmi le phytoplancton et le zooplancton se retrouvent dans les couches plus profondes de l'océan par le même processus que la pompe de carbone organique et se retrouvent eux aussi parmi la neige marine. L'état de saturation de l'aragonite et de la calcite est sous-saturé dans les eaux profondes, c'est-à-dire

sous l'horizon de saturation où la pression est élevée, la température est froide et le pH plus acide.

C'est en profondeur que la contre-pompe retransforme du  $\text{CO}_2$  en ions bicarbonates en rehaussant l'alcalinité totale, comme dans la formule 1.2. Ainsi une partie du  $\text{CaCO}_3$  est dissoute dans les eaux profondes et une autre partie est sédimentée, permettant ainsi de stocker du carbone inorganique à long terme. Ce sont les mouvements d'*upwelling* qui font remonter des eaux alcalines en surface, permettant ainsi aux océans de pouvoir absorber du  $\text{CO}_2$  atmosphérique supplémentaire.



**Figure 2.3 : Schémas illustrant les pompes de solubilité, de carbone organique et de contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$**

Source : CDB, (2010). p.14

### 2.2.2 Rôle des bactéries et virus

Le phytoplancton, en addition aux bactéries et aux virus, comptent pour 90 % de la biomasse océanique (UNEP, 2009). Si l'on connaît bien le rôle du phytoplancton dans le cycle



océanique, c'est moins le cas pour le rôle des virus et des bactéries, qu'on commence seulement à comprendre.

Les virus n'ont été que récemment pris en compte dans les cycles biologiques des océans et pourtant, leur rôle dans le cycle du carbone n'est pas négligeable. Par l'infection de 20 à 40 % des procaryotes à la surface de l'eau, ils contribuent à relâcher 108 à 109 TC/jour de la biosphère vers l'hydrosphère. Il existe toujours un débat quant à savoir si les virus contribuent à amplifier l'effet de la pompe biologique ou plutôt à le réduire. C'est une question intéressante à résoudre, puisqu'à un rythme de 1 023 infections virales par seconde dans l'océan, la compréhension de l'action virale pourra aider à appliquer des mesures pour le maintien de la productivité du processus de pompe biologique, et ce, en ayant pris en compte toutes les variables (UNEP, 2009).

Une partie des bactéries marines sont capables de capter du CO<sub>2</sub> par photosynthèse, puisqu'environ la moitié d'entre elles possèdent un pigment photosynthétique nommé protéorhodopsin, qui capte le CO<sub>2</sub> disponible dissous et le convertit en sucre. D'autres bactéries sont aussi responsables de la déminéralisation du C<sub>org</sub> en profondeur dans son parcours suivi dans la pompe biologique (UNEP, 2009). La compréhension de l'action bactérienne est aussi importante pour les prédictions par rapport au puits océanique.

### **2.2.3 La faune marine**

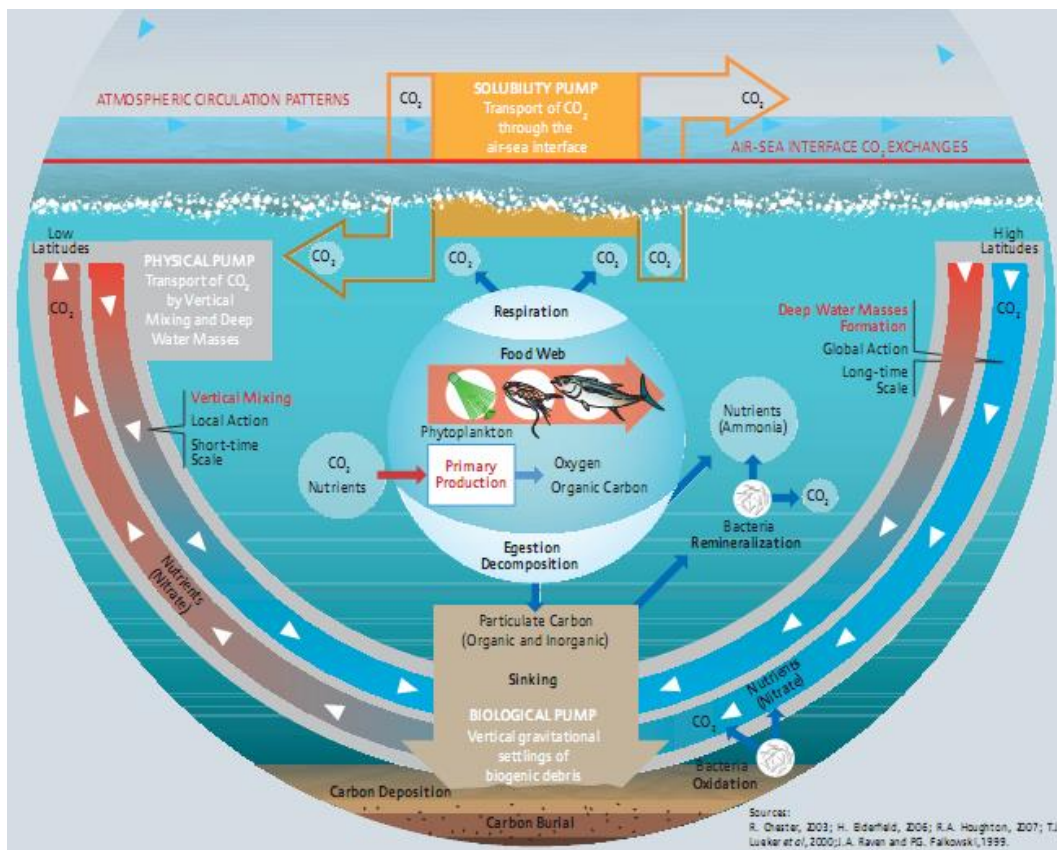
Le rôle de la faune marine est également à considérer dans la contribution à la pompe biologique. En plus de contribuer à la séquestration du carbone à leur mort en s'ajoutant à la neige marine, leurs excréments jouent également un rôle. Par exemple, les excréments des cachalots fournissent et dispersent du fer dans la zone photique à un taux de 50 t/an (Lavery *et al.*, 2010). Cet élément est limitant à la croissance phytoplanctonique. Ces mammifères contribuent donc directement à la production primaire en surface océanique et indirectement à la séquestration du carbone en profondeur à un taux de  $4 \times 10^5$  TC/an, ce qui est de deux fois supérieur à leur taux respiratoire. Cette contribution est toutefois compromise par la chasse

aux baleines. Il est même estimé que cette contribution serait de dix fois supérieure à celle d'aujourd'hui s'il n'y avait pas eu cette chasse depuis les derniers siècles (Lavery *et al.*, 2010). Il est donc essentiel de poursuivre les efforts de conservation des baleines par le respect de la Convention internationale pour la réglementation de la chasse à la baleine et le moratoire de chasse qu'elle impose (IWC, 2013). Les pays qui s'opposent à cet objectif devraient considérer que non seulement la protection des baleines est important pour le maintien de la biodiversité, mais favorise également la réduction de la concentration atmosphérique du gaz carbonique.

Les poissons, quant à eux, contribuent de 3 à 15 % au cycle du carbone inorganique en formant un précipité de carbonate de calcium ou de magnésium au niveau de leurs intestins, qu'ils excrètent avec un taux élevé. Majoritairement magnésien, ce précipité se dissout facilement en profondeur pour augmenter l'alcalinité totale des eaux. Leur contribution à la contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$  pourrait s'accroître justement avec l'augmentation de la  $\text{pCO}_2$  de l'eau (Wilson *et al.*, 2009). Tout comme pour les baleines, la surpêche de poissons est une menace réelle à ce processus et une saine gestion des pêches aiderait incontestablement à la sauvegarde des stocks de poisson, ainsi qu'au maintien d'une l'alcalinité plus élevée.

### **2.2.1 Flux de carbone**

Selon l'étude de l'UNEP (2009), la durée du stockage de carbone dans les sédiments marins dû à la pompe biologique est estimée à des décennies jusqu'à des siècles. La proportion du carbone utilisé par le phytoplancton qui atteint le fond des mers et est sédimentée représente seulement 0,1 % (CDB, 2010). Gonzalez *et al.* (2008) ont estimé à 36,5 Gt C/an de  $\text{CO}_2$  capté par la production du phytoplancton. Tel que mentionné dans la section 2.2., seulement une portion de ce carbone est sédimentée dans les fonds océaniques. Seiter *et al.* (2005) ont estimé cette portion à 0,5 Gt C/an, ou 0,5 Pg C/an (UNEP, 2009).



**Figure 2.4 : Schéma illustrant les procédés de la pompe de solubilité et de la pompe biologique.** (La dissolution ou le dégazage du CO<sub>2</sub> sont illustrés à l'interface air-eau; le déplacement des masses d'eau et le mélange vertical des eaux, éléments de la pompe de solubilité, sont illustrés par les demi-cercles bleu et rouge; au centre, un schéma présentant les intrants et les extrants de la chaîne trophique illustre le processus de la pompe biologique; dans le bas de l'image, la flèche brune illustre le carbone qui sédimente et qui est stocké à long terme au fond des océans.)

Source : UNEP (2009). p.24

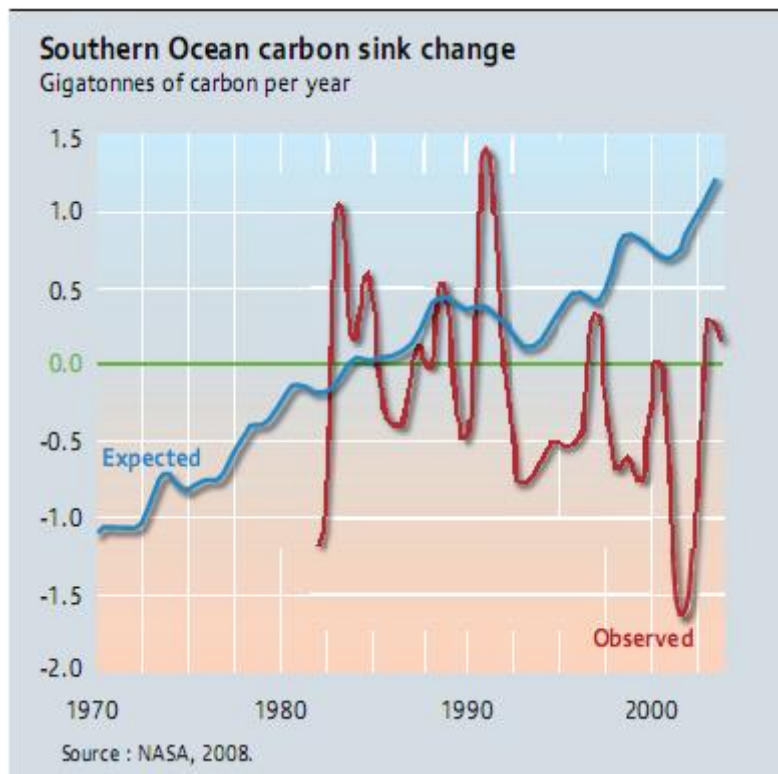
## 2.2.2 Menaces

Les changements de température, de la disponibilité des nutriments, de la circulation et du mélange des eaux ont tous le potentiel de réduire la production primaire des océans et ainsi de réduire leur capacité de capter le CO<sub>2</sub> atmosphérique et de le transporter jusqu'aux sédiments marins.

Le réchauffement des eaux de surface affecte à lui seul la distribution des espèces marines. En effet, certaines espèces se sont déplacées plus en profondeur afin d'éviter la chaleur en surface. Également, certaines espèces de zooplancton, de poissons et d'autres espèces fauniques ont migré de quelques centaines de kilomètres vers de plus hautes altitudes (Cheung *et al.*, 2009). Ces déplacements causés par le réchauffement des eaux de surface peuvent modifier l'efficacité de la pompe biologique, affectant possiblement la production primaire par une modification de la disponibilité de la lumière et des nutriments, de même qu'en affectant le transport du  $C_{org}$  vers les couches inférieures océaniques par la modification du réseau trophique.

La stratification des eaux est renforcée par le réchauffement des eaux de surface, ainsi que l'abaissement de la salinité en surface par l'ajout d'eau douce provenant de la fonte des glaces continentales. Ceci compromet grandement les mouvements verticaux des masses d'eau, responsables de la circulation océanique qui redistribue nutriments et carbone. En addition aux changements de régime des vents, qui contrôlent les *upwellings*, ces remontées d'eaux profondes pourraient diminuer en importance, réduisant ainsi l'apport de nutriments aux écosystèmes marins les plus productifs et compromettant la productivité primaire à la base du processus de pompe biologique (UNEP, 2009).

Une diminution de la production primaire en raison d'une stratification renforcée et une diminution de l'apport de nutriment est déjà observable dans les mers tempérée de moyenne latitude et rapportée par les études de Cushing (1989), Valdés et Moral (1998) et Valdés *et al.* (2007). La figure 2.5 illustre une diminution observée du puits de carbone océanique dans l'hémisphère sud par rapport à ce qui était attendu. Ainsi, il est déjà possible d'observer les effets des changements climatiques sur les systèmes biologiques par rapport à ce qui devrait normalement se produire.



**Figure 2.5 : Déclin de la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> de l'océan dans l'hémisphère Sud en raison de la stratification des eaux.** (La courbe bleu est la capacité d'absorption de Gt C/an attendue selon les années. La courbe rouge représente l'absorption de Gt C/an réelle observée selon les années.)

Source : UNEP (2009). p.32

### 2.2.3 Effet de l'acidification

L'acidification des océans et la remontée de l'horizon de saturation de l'aragonite et de la calcite menacent également l'efficacité de la pompe biologique par l'affaiblissement du taux de calcification des organismes calcifiants. C'est dans les régions polaires, où l'état de saturation est déjà normalement bas, que ce phénomène est le plus préoccupant. De nombreux organismes marins utilisent l'aragonite ou la calcite dissoute pour construire des structures essentielles, tels leurs endosquelettes et exosquelettes. Ce sont donc des espèces pélagiques de coccolithophores, de foraminifères, de ptéropodes, ainsi que des espèces benthiques comme des échinodermes, des coraux, des algues corallines, des mollusques et certaines espèces de crustacés qui seront affectés par l'abaissement de pH océanique. Les impacts négatifs observés

sont, dans la majorité des cas, au niveau de la croissance, de la protection et de la reproduction, et donc, au niveau de leur *fitness* (CDB, 2010).

Les poissons et les mammifères marins montrent également des signes de vulnérabilité à un abaissement de pH lors d'expérimentations. Une acidose peut notamment réduire l'énergie disponible, tout comme les adaptations physiologiques nécessaires à l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$  demandent une quantité supplémentaire d'énergie, ce qui peut donc affecter la croissance et la reproduction. Une augmentation de la  $p\text{CO}_2$  pourrait aussi modifier le comportement de certaines espèces à des stades critiques de leur vie. De plus, des individus de bar blanc (*Atractoscion nobilis*) ont été placés dans un milieu à  $p\text{CO}_2$  élevé durant toute leur croissance, et ont développé des otolithes, structure d'aragonite nécessaire à l'orientation des poissons, plus grands que la norme. Il n'est pas connu si de plus grands otolithes sont néfastes pour les poissons (CDB, 2010).

La neige marine coule sous le poids des détritiques, des organismes morts et des amas de matières particulaires. L'abaissement du pH de l'eau de mer réduit l'état de saturation du  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega$ ), rendant ainsi la calcification plus difficile pour les organismes utilisant ces molécules. Leur structure calcifiée moins dense diminuera leur ballast et par le fait même leur vitesse de précipitation parmi la neige marine et diminuera donc leur taux de sédimentation (CDB, 2010). L'abaissement du *fitness* de plusieurs organismes marins pourra diminuer la biomasse totale océanique et donc diminuer la quantité de carbone sédimenté. L'ajout de  $\text{CO}_2$  dissous a donc un impact négatif important sur la séquestration du carbone par le processus de la pompe biologique.

## 2.3 Écosystèmes

Les écosystèmes côtiers rendent des services écologiques estimés à une valeur de 25 000 milliards \$ US annuellement. Ces services sont principalement la filtration de l'eau, la réduction de la pollution côtière, l'apport de nutriment, la sédimentation, la protection des côtes contre l'érosion, la diminution des effets des événements climatiques extrêmes, de même que le support des ressources de pêcheries. La valeur de certains écosystèmes est une faible estimation, car la valeur d'un service environnemental essentiel n'y est pas incluse, c'est-à-dire la séquestration du carbone (UNEP, 2009).

Les forêts de mangroves, les marais salés et les prairies côtières, aussi appelées herbiers, sont parmi les puits de carbone les plus efficaces de la planète. Leur biomasse équivaut à 0,05 % de la biomasse terrestre, mais ils peuvent stocker l'équivalent de carbone par année (UNEP, 2009). Les forêts de macro-algues comptent aussi parmi les puits de carbone bleu significatifs, étant des écosystèmes très productifs, bien qu'ils permettent de stocker une quantité de carbone moins importante à long terme (IUCN, 2009).

Les récifs coralliens ne sont pas de véritables puits de carbone, puisque la majorité des récifs ont un bilan net de production de CO<sub>2</sub> (Smith et Gattuso, 2009). Malgré tout, ce sont les écosystèmes marins qui risquent d'être le plus affectés par l'acidification des océans (Smith et Gattuso, 2009). En raison du rôle capital des récifs dans la préservation de la biodiversité et de la valeur élevée de leurs biens et services environnementaux, il est nécessaire d'évaluer les effets de l'acidification sur leur subsistance ainsi que sur l'utilisation du carbone au sein de ces écosystèmes.

Il existe des aires marines qui ne sont pas végétalisées, mais où une quantité importante de carbone est déposée par sédimentation. Les estuaires peuvent stocker jusqu'à 81 Tg C/an sur une superficie approximative de 1,8 million de km<sup>2</sup>, tandis que les marges côtières peuvent stocker jusqu'à 45,2 Tg C/an sur une superficie de 26,6 millions de km<sup>2</sup> (UNEP, 2009).

Cependant, ces puits de carbone ne seront pas étudiés plus en détail dans ce document, étant donné le manque de données disponibles à leur sujet.

### **2.3.1 Marais salés**

Les marais d'eau salée sont des écosystèmes situés en zone intertidale et dominés par des plantes vasculaires tolérantes au sel, mais aussi peuplés de macro-algues, de diatomées et de cyanobactéries. Ils sont majoritairement répandus sur des rivages protégés des vagues en région tempérée, mais peuvent aussi être retrouvés en région subarctique ou généralement derrière les forêts de mangroves en région tropicale (IUCN, 2009). L'aire occupée par ces écosystèmes est estimée à 400 000 km<sup>2</sup> (UNEP, 2009). Ces milieux côtiers ont une valeur reconnue en raison de services environnementaux rendus, comme la protection des côtes et la préservation de la biodiversité, comme plusieurs espèces de plantes, d'oiseaux et de poissons servant de ressources alimentaires. Ces systèmes sont une source de nutriments et de matériaux organiques pour d'autres communautés marines. Ils servent également de puits pour des polluants qui autrement causeraient des dommages à l'environnement, tout comme ils sont des puits de sédiments et de matières organiques (Boorman, 1999). Les marais salants offrent aussi comme service économique la récolte de plantes pour consommation ou la commercialisation (IUCN, 2009).

Le carbone est capturé dans le sol des marais, au taux substantiel de 210 g C/m<sup>2</sup>/an, ce qui équivaut environ de 1 à 2 % des puits de carbone des États-Unis (IUCN, 2009). D'autres données estiment un taux de séquestration à 1,51 Tg C/ha/an et 430 Tg C stockés globalement à long terme dans les couches supérieures du sol (IUCN, 2009; UNEP, 2009).

En raison de la présence de sulfates dans les sols de ces marais, l'activité microbienne est réduite, ce qui réduit la quantité de méthane produit. Ainsi, ces écosystèmes ont un bilan net de séquestration de carbone probablement plus élevé que tous autres écosystèmes naturels qui produisent tous pour la plupart une quantité variable de GES (IUCN, 2009).



Les menaces auxquelles font face ces écosystèmes sont de nature anthropique ou environnementale. Une partie importante des aires occupées par les marais salants ont été perdues par dragage, par remblaiement, par drainage, par eutrophisation ou encore par la construction de routes (IUCN, 2009). Étant des milieux tampons qui absorbent les substances polluantes, cette propriété pourrait bien les désavantager puisqu'à long terme, la présence de métaux lourds et de polluants organiques dans les sols pourrait perturber leur pérennité (Boorman, 1999).

Les changements climatiques s'accompagnent de l'élévation du niveau des mers. La végétation des marais salants a besoin d'être en contact avec l'atmosphère, ainsi ces écosystèmes devront reculer dans les terres afin de garantir leur durabilité. Cependant, l'occupation des terres s'est répandue dans bien des cas jusqu'à la côte, laissant très peu de superficies disponibles pour un recul de la végétation vers les terres (IUCN, 2009). Également, les changements climatiques ont occasionné une intensification des vagues et des tempêtes, augmentant ainsi l'érosion des côtes, dont les sols des marais salants (CDB, 2010).

Il n'y a pas de données disponibles concernant les effets de variations de pH sur les marais salants. Les espèces qui dominent ces milieux sont des plantes vasculaires qui utilisent directement le  $\text{CO}_2$  atmosphérique pour leur croissance, il est ainsi possible qu'une augmentation de la  $\text{pCO}_2$  de l'atmosphère favorise la croissance de ces producteurs primaires et la séquestration de ce carbone excédentaire. Cependant, il y a un besoin urgent d'étudier les véritables effets de l'ajout de  $\text{CO}_2$  atmosphérique sur ces écosystèmes, de même que la relation des espèces de marais salants avec le pH de l'eau de mer.

### **2.3.2 Prairies côtières**

Ces milieux sont peuplés de plantes aquatiques à fleurs, jusqu'à 60 différentes espèces, qui forment de vastes et denses prairies sous-marines, dans des eaux côtières peu profondes. Ils sont répandus mondialement autour de tous les continents, sauf l'Antarctique, pour occuper

une superficie estimée de 300 000 km<sup>2</sup> à 600 000 km<sup>2</sup>, ce qui équivaut environ à une portion de 1 % de la surface océanique (IUCN, 2009).

Les biens et services rendus par ces écosystèmes ont une valeur plus élevée que la plupart des écosystèmes terrestres et marins. Les feuilles d'herbiers sont consommées par une faune de grande taille, comme des dugongs (*Dugong dugon*), des tortues, des oies et des poissons. Ces feuilles servent également de substrat à une grande variété d'algues et d'invertébrés, qui sont aussi consommés par une diversité faunique vivant dans les prairies côtières ou migrant d'autres habitats pour se nourrir. C'est également un milieu servant d'aire d'alevinage et d'abri pour les alevins, les crevettes en stade postlarvaire et plusieurs autres animaux. Les herbiers permettent également de nettoyer l'eau des matières en suspension en les piégeant et les faisant sédimer. Les racines et les rhizomes stabilisent les sédiments et empêchent l'érosion lors d'événements climatiques intenses (IUCN, 2009).

Les prairies côtières peuvent enterrer une grande quantité de carbone minéralisé. Cette propriété en fait un puits de carbone significatif, qui est responsable d'environ 15 % de la séquestration océanique du carbone (IUCN, 2009). La séquestration du carbone à long terme est estimée à 83 TC/ha/an, qui se traduit à un taux global de stockage variant de 27 à 44 Tg C/an (UNEP, 2009). Le stock global de carbone dans les plantes et le sol est quant à lui estimé à 2,16 Pg C (IUCN, 2009).

La biomasse des herbiers possède un taux de renouvellement de la matière assez long, soit deux semaines à cinq ans pour les feuilles et les racines, et jusqu'à des millénaires pour des rhizomes. Ainsi, la contribution des prairies côtières est très significative par rapport à la superficie qu'elles occupent. Une des espèces d'herbier les plus efficaces pour stocker du carbone à long terme est *Posidonia oceanica*, et les prairies qui en sont peuplées présentent un taux d'accumulation de carbone qui dépasse largement celui de plusieurs écosystèmes terrestres (IUCN, 2009).

Bien que les prairies côtières jouent un rôle important dans la séquestration à long terme du carbone et qu'ils rendent des services environnementaux importants, environ les deux tiers des

herbiers d'origine à travers le monde ont été perdus en raison d'activités anthropiques, responsables de l'eutrophisation et de l'envasement de ces milieux (IUCN, 2009).

Les herbiers nécessitent beaucoup de lumière pour leur photosynthèse, c'est pourquoi ils sont particulièrement affectés par l'augmentation de la turbidité résultant des sédiments apportés par lessivage des terres et des décharges d'eaux usées (IUCN, 2009).

Il est probable que l'abaissement du pH de l'eau de mer affecte la photosynthèse et la croissance des herbiers. Cependant, plus de données sont nécessaires afin de pouvoir connaître le réel effet de l'acidification sur la productivité des prairies côtières (IUCN, 2009).

### **2.3.3 Forêts de mangroves**

Les forêts de mangrove sont des écosystèmes côtiers répartis essentiellement sur les côtes tropicales et subtropicales, dans la zone intertidale. Ces forêts, situées au-dessus du niveau des mers, sont composées en majeure partie d'espèces d'arbres-mangroves, ou palétuviers, résistants au sel, mais aussi d'autres producteurs primaires tels des macroalgues, des épiphytes, du périphyton et du phytoplancton (Gattuso *et al.*, 1998). La superficie totale occupée par cet écosystème est estimée entre 157 000 à 160 000 km<sup>2</sup>, ce qui représente moins de 1 % de la surface forestière sur Terre (Ayukai, 1998; IUCN, 2009).

Ces écosystèmes ont une grande valeur économique par les biens et services qu'ils rendent aux humains, mais aussi à d'autres écosystèmes. Ces forêts protègent les rivages de l'érosion faite par les vagues et le vent, permettent de préserver d'autres écosystèmes côtiers tels les récifs coralliens et les herbiers grâce à la régulation des nutriments et de la matière en suspension, et abritent une grande diversité d'espèces de poissons pêchées, de reptiles et d'oiseaux (Ayukai, 1998).

La séquestration totale de carbone par ces écosystèmes est estimée à 18,4 Tg C/an, ou à un taux de 1,39 TC/ha/an (IUCN, 2009; UNEP, 2009). Le carbone stocké dans la biomasse sur

piéd est estimé à  $7\,990\text{ gC/m}^2$  et le stock de carbone global des mangroves est estimé à  $1,2\text{ Pg C}$  (IUCN, 2009). Ce sont dans les sédiments de ces forêts que le carbone est stocké, retenu entre les racines des arbres. Ce carbone peut y rester stocké pour des millénaires (UNEP, 2009). Comptant parmi les écosystèmes les plus productifs de la planète et malgré la faible superficie occupée par ces forêts, la quantité de carbone stocké par unité de surface est considérable (Ayukai, 1998).

Selon l'étude de Gattuso *et al.* (1998), la production primaire nette globale des mangroves est estimée à  $18\text{ Tmol C/an}$ . De cette production primaire, il est estimé qu'environ  $4,2\text{ Tmol C/an}$  est généralement exporté vers d'autres milieux, tandis que l'autre partie, qui n'est pas consommée, est sédimentée à un taux moyen d'accumulation de  $23\text{ mol C/m}^2\text{/an}$ . Les données de cette étude convertie en masse, avec une masse molaire de  $12\text{ g/mol}$  pour le carbone, donnent respectivement  $216\text{ Tg C/an}$ ,  $50,4\text{ Tg C/an}$ , puis  $276\text{ g/m}^2\text{/an}$ .

La superficie qu'occupaient les forêts de mangroves autrefois, estimée à 75 % de la zone côtière mondiale, a été réduite d'au moins la moitié en raison du développement urbain, hôtelier, industriel, agricole et aquacole en zone côtière (IUCN, 2009). En plus de ce changement d'utilisation des terres, les populations humaines exercent des pressions sur ces écosystèmes en récoltant des quantités importantes de bois, de tourbe, ou de ressources alimentaires. Le nettoyage de cette végétation entraîne une libération de carbone vers l'atmosphère d'environ  $39,3\text{ Mmol C/ha}$ , de même que  $31,3\text{ Mmol C}$  par 1 000 tonnes de tourbe brûlée (Gattuso *et al.*, 1998).

Ces forêts peuvent résister à des catastrophes naturelles, mais sont tout de même sensibles à certaines activités anthropiques, comme des déversements pétroliers ou la surpêche (Dawes *et al.*, 1999). Cette surpêche menace la survie des écosystèmes marins en créant un important déséquilibre dans le réseau trophique. La pollution de l'eau en zone côtière, de même que la construction de barrages qui modifient la salinité de l'eau sont d'autres menaces à la santé de ces écosystèmes (IUCN, 2009).

L'acidification de l'eau de mer a un effet évident sur la chaîne trophique des écosystèmes marins et côtiers, et donc sur la chaîne trophique des forêts de mangroves. Par contre, l'effet de l'acidification sur les arbres et leur physiologie est très peu documenté; les efforts ayant été concentrés sur la chimie du carbonate et les organismes calcifiants. Il est toutefois connu que la préservation du  $C_{org}$  dans les sédiments est favorisée par un pH bas et des conditions d'anoxie. De plus, le pH de la vase au sol des forêts de mangrove est naturellement bas, fréquemment situé entre 3 et 4, donc beaucoup plus bas que le pH de l'eau de mer (Ayukai, 1998). Avec ces informations, une hypothèse à considérer serait que l'acidification des océans n'aura pas ou peu d'effet sur la faune et la flore vivant dans les sédiments, et n'aura donc pas d'effet sur la séquestration du carbone à long terme dans les forêts de mangroves.

#### **2.3.4 Forêts de macroalgues**

Les forêts de macro-algues sont composées d'assemblages d'algues brunes majoritairement de l'ordre des Laminaires, mais on y retrouve également des espèces de l'ordre des Fucales. Les macroalgues peuplant ces écosystèmes proviennent de plusieurs groupes taxonomiques et possèdent des morphologies diverses. Les milieux occupés par ces forêts sont des eaux côtières peu profondes, soit moins de 30 mètres, sur un fond rocheux où les algues s'attachent par leur pied. Certaines macroalgues peuvent par contre être retrouvées à de plus grandes profondeurs, par exemple jusqu'à 200 mètres, dans les endroits où l'eau est d'une grande clarté, comme dans les régions tropicales. Les macroalgues, les plus grandes algues sur Terre, sont connues pour former des canopées flottantes depuis leur substrat d'attachement, traversant ainsi toute la colonne d'eau. Elles peuvent également former des canopées sous la surface, de même que des canopées recouvrant le sol. Il n'existe pas de répertoire exhaustif de la distribution globale des forêts de macro-algues, mais elles se retrouvent généralement en régions tempérées et aux hautes latitudes. En fait, il est connu que les macroalgues sont les producteurs dominants des eaux peu profondes à substrat rocheux dans ces régions. Il a été estimé que la longueur de la côte où on peut s'attendre à retrouver ces forêts est de 58 774 km (IUCN, 2009).

Ces écosystèmes sont donc parmi les plus diversifiés en régions tempérées, dont une partie de cette biodiversité a une grande valeur commerciale et récréative, dont plusieurs espèces de mollusques, de crustacés et de poissons. Les macroalgues elles-mêmes sont récoltées pour divers usages. Ainsi, en plus de jouer un rôle de conservation de biodiversité, les forêts de macro-algues sont une source de nourriture, même pour les habitats adjacents, et possèdent une valeur récréative, culturelle et éducationnelle (IUCN, 2009).

Avec beaucoup de réserve, la biomasse vivante globale des macroalgues est estimée à environ 7,5 Tg C, en plus de 20 % de la biomasse des algues associées, en estimant une densité de biomasse moyenne à 500 g C/an et une largeur de forêt moyenne de 500 m, limitée à la zone côtière. En incluant les macroalgues qu'on pourrait retrouver en profondeur, l'estimation globale est plutôt de 20 Tg C (IUCN, 2009).

Les forêts de macro-algues ont un taux de production primaire et de renouvellement très élevé et sont parmi les écosystèmes les plus productifs au monde, puisque les macroalgues sont parmi les organismes autotrophes ayant la croissance la plus rapide. En raison des méthodes très variées utilisées pour mesurer leur productivité, l'estimation de la production globale de 15 Tg C/an reste conservatrice. En incluant celles des eaux profondes, la production globale peut atteindre 39 Tg C/an (IUCN, 2009)

Dans les forêts de macro-algues, une petite portion de la biomasse sur pied contribue à la production primaire nette élevée, ce qui signifie un renouvellement très rapide de la biomasse, allant jusqu'à 10 fois par an. Également, la matière organique s'accumule peu dans la litière, puisque les détritiques sont rapidement consommés, décomposés, recyclés, ou encore exportés vers d'autres écosystèmes. Ainsi, le carbone est plutôt stocké en bonne partie dans la biomasse vivante à court terme. Pour qu'il soit stocké à long terme dans des sédiments ou d'autres réservoirs, cela dépend de l'efficacité avec laquelle les particules qui se détachent et se dissolvent seront sédimentées, plutôt que consommées ou exportées, ce qui représente une faible proportion. Donc, l'estimation la plus représentative de la capacité de séquestration du carbone par les forêts de macro-algues est directement liée à la quantité et aux conditions d'un habitat viable pour développer la biomasse vivante (IUCN, 2009).

Les forêts de macro-algues sont menacées entre autres par les activités anthropiques, de même que par les changements climatiques. Tout d'abord, les eaux usées municipales, industrielles et agricoles sont déversées en zone côtière et altèrent l'environnement où l'on retrouve les macroalgues. Ceci résulte en l'augmentation de la turbidité, qui réduit la photosynthèse en profondeur. De plus, cet apport d'eaux usées augmente la sédimentation, diminuant la quantité de substrat disponible pour l'attachement des macroalgues. L'eutrophisation de ces écosystèmes peut avoir des effets bénéfiques sur la croissance et le recrutement des algues en milieu oligotrophe, tandis que dans les milieux eutrophes, la compétitivité des espèces de macroalgues peut être affaiblie, pour mener à leur disparition (IUCN, 2009).

La plus grande menace humaine est probablement la surpêche des prédateurs dans les communautés fauniques de macro-algues, tels les homards, les poissons et les loutres de mer (*Enhydra lutris*) (IUCN, 2009). Cette pêche sélective cause un déséquilibre dans la chaîne trophique, ce qui permet aux organismes brouteurs de se multiplier sans pression, en exerçant eux-mêmes une plus forte pression sur les producteurs primaires, les macroalgues (IUCN, 2009).

Il est difficile de prédire les impacts qu'auront les changements climatiques sur les forêts de macro-algues, tout comme l'ampleur des impacts anthropiques, puisque ce sont des écosystèmes très dynamiques. Il est toutefois prédictible qu'une amplification de la stratification de la colonne d'eau puisse réduire l'apport de nutriment aux macroalgues, ce qui pourra avoir comme conséquence d'affecter leur croissance (IUCN, 2009).

Également, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes est une des menaces les plus importantes pour la capacité de ces forêts côtières de produire et stocker du carbone, en raison des vagues qui affectent la biomasse sur pied et affaiblissent sa force d'attachement à son substrat (IUCN, 2009).

Il est attendu qu'une augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique et dissous favoriserait la photosynthèse et la croissance des algues. En fait, ce sera surtout les

macroalgues formant les canopées en surface qui bénéficieront le plus directement de cette augmentation, pouvant exploiter le carbone à l'interface eau-air (IUCN, 2009).

L'information par rapport aux effets physiologiques du pH sur les macroalgues est très limitée, il est donc très difficile de prévoir l'effet d'une acidification océanique sur ces écosystèmes (IUCN, 2009). Par contre, il est possible de déduire que l'effet de l'acidification sur la faune occupant ces écosystèmes tels les poissons, les échinodermes et les crustacés pourra modifier la chaîne trophique des communautés (CDB, 2010). L'effet de l'acidification sur la capacité de séquestration de carbone est déterminé selon le niveau trophique des organismes affectés. Par exemple, si ce sont les organismes au sommet de la chaîne trophique qui sont affectés, cela réduit la pression prédatrice sur les herbivores qui consommeront plus de macroalgues, ce qui affaiblira ce puits de carbone. Sinon, au contraire, dans le cas où la faune à la base de la chaîne alimentaire serait affectée par l'acidification, cela réduirait la pression de prédation sur les producteurs primaires, leur permettant une plus large expansion et favorisant ainsi la séquestration de carbone dans la biomasse sur pied.

Malgré tout, des études sur les effets de l'acidification sur les forêts de macro-algues sont nécessaires pour confirmer ces hypothèses. Pour l'instant, l'avantage que tirent les macroalgues de l'augmentation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> laisse croire que ces puits de carbone pourront être avantagés par les causes de l'acidification des océans.

### **2.3.5 Récifs coralliens**

Les récifs coralliens sont formés par le dépôt de carbonate de calcium provenant des organismes qui les occupent, les coraux. Les coraux hermatypiques, c'est-à-dire produisant du carbonate de calcium pour former leur squelette, proviennent de l'ordre des *Scleractinia* (Osborne, 2000). Les coraux sont formés de la symbiose entre deux organismes : un animal et un végétal. Les polypes, mesurant dans bien des cas seulement quelques millimètres de diamètre, excrètent un squelette de carbonate de calcium autour d'eux, où vont se loger des algues unicellulaires, les zooxanthelles. Cette association symbiotique permet aux coraux



d'être des organismes autotrophes, jusqu'à ce que les facteurs environnementaux ne soient plus optimaux (Marshall et Clode, 2004).

Les récifs coralliens sont les écosystèmes ayant une des valeurs économiques calculées les plus élevées, puisqu'ils abritent la plus grande biodiversité mondiale, équivalant à environ 25 % de toutes les espèces marines. Ils offrent également des services alimentaires, récréatifs, économiques et de protection des côtes pour plus de 500 millions de personnes (Smith et Gattuso, 2009).

La superficie occupée par les récifs de coraux est estimée à 600 000 km<sup>2</sup>, entre 0 et 30 mètres de profondeur, généralement en zone côtière. Plusieurs facteurs limitent la croissance corallienne et donc les aires de répartition. Les coraux se développent de préférence dans la zone photique, avec peu de turbidité et de faibles vagues, dans un petit intervalle de température et de salinité, au-dessus de l'horizon de saturation de l'aragonite (Achituv et Dubinsky, 1990; Veron, 2000).

Les récifs coralliens ne sont pas considérés des puits de carbone, mais ce sont les écosystèmes dont les effets de l'acidification océanique sont les plus étudiés. Étant donné leur importance pour les populations humaines, leur vulnérabilité à une modification du pH marin et la possibilité d'une modification des flux de carbone en raison de cette acidification, ces écosystèmes sont analysés dans ce document.

Les coraux hermatypiques jouent un rôle important dans le cycle du carbone inorganique par l'utilisation des ions bicarbonates pour précipiter du carbonate de calcium qui forme leur squelette. Ils sont un réservoir important de CaCO<sub>3</sub> et de carbone organique. En effet, ce sont les organismes les plus performants dans la calcification et la photosynthèse, lorsque tous les facteurs environnementaux leur sont favorables (Enríquez *et al.*, 2005). Par contre, le carbone organique est retrouvé majoritairement dans la biomasse vivante, les sédiments étant formés presque exclusivement de carbone inorganique. Le rapport entre la production primaire et la respiration pour plusieurs récifs est près ou légèrement au-dessus de 0, ce qui signifie que le

flux de CO<sub>2</sub> ne va pas significativement plus vers la biomasse que vers l'hydrosphère (Smith et Gattuso, 2009).

Conséquemment, ce ne sont pas des puits de carbone pour le CO<sub>2</sub>, puisque la précipitation d'une mole CaCO<sub>3</sub> libère une mole de CO<sub>2</sub> vers l'eau de mer, selon la formule :



Ce CO<sub>2</sub> est bien sûr tamponné par le système carbonate océanique, et n'est donc pas nécessairement libéré vers l'atmosphère, mais il fait augmenter la pCO<sub>2</sub> de l'océan, ce qui réduit le flux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère vers l'hydrosphère. Il est donc estimé que les récifs coralliens sont une source de carbone pour une quantité approximative de 50 Tg C/an (Smith et Gattuso, 2009).

La calcification des coraux est généralement optimale entre de température de 25 à 29 °C (Well, 1956). Les températures trop extrêmes réduisent le taux de calcification et de photosynthèse, et des températures trop chaudes peuvent déclencher l'expulsion des algues symbiotiques zooxanthelles comme réaction de stress, ce qui mène au blanchiment des coraux. Ce blanchiment mènera à la mortalité des coraux si la période de chaleur se prolonge trop longtemps (Jokiel et Coles, 1977). C'est une des conséquences les plus visibles des changements climatiques.

Le réchauffement global fait également fondre les glaces continentales, ce qui apporte une quantité importante d'eau douce dans l'océan, et modifie la salinité. Également, la modification des patrons d'évapotranspiration et de précipitation cause des événements climatiques plus extrêmes, telles des pluies torrentielles ou des ouragans, modifiant temporairement la salinité de l'eau et intensifiant la force des vagues, deux choses auxquelles les coraux sont peu tolérants (Osborne, 2000).

Quant aux activités humaines, celles augmentant la turbidité de l'eau, comme le déversement d'eaux usées et le lessivage des terres, affectent la croissance des coraux qui sont dépendants

de la lumière pour leur photosynthèse. Le dépôt de matière en suspension sur les tissus vivants des coraux leur coupe de la lumière et de l'oxygène, en plus de leur coûter cher en énergie pour retirer ces sédiments à l'aide de cils ou de tentacules. L'industrie du tourisme affecte également la survie des récifs coralliens par la récolte de spécimens, l'ancrage, les dommages physiques causés par les bateaux et même la plongée sous-marine. Il a été estimé que depuis 1950, 19 % de la superficie originellement occupée par les récifs de coraux a été perdue (Osborne, 2000). Une grande proportion des récifs actuels sont menacés de disparaître dans les prochaines décennies.

Comme tous les organismes sclérifiants, les coraux, étant majoritairement composés d'aragonite, doivent se retrouver dans un milieu où l'état de saturation de l'aragonite ( $\Omega$ ) est hypersaturé, et donc au-dessus de l'horizon de saturation. Étant donné qu'une augmentation de la concentration du  $\text{CO}_2$  dissous abaisse le pH de l'eau de mer, diminue l'état de saturation de l'aragonite et fait remonter l'horizon de saturation, cela affectera assurément les récifs coralliens (Smith et Gattuso, 2009). Un abaissement de l'état de saturation diminue la disponibilité des ions bicarbonates nécessaires à la calcification. Selon une expérience menée dans l'écosystème du laboratoire Biosphère II, un abaissement  $\Omega$  de 5,0 à 3,2 occasionne une chute de 30 % de la calcification des coraux (Kleypas *et al.*, 1999b). Également, la remontée de l'horizon de saturation limitera l'aire de répartition disponible pour les récifs.

Dans le cas où l'eau entourant les coraux deviendrait sous-saturée en aragonite, la structure des récifs et le squelette des coraux commenceraient à se dissoudre dans l'eau pour augmenter l'alcalinité totale. Dans un tel cas, le  $\text{CO}_2$  sera piégé plutôt que libéré, et l'importance des récifs en tant que source de carbone sera diminuée. La source pourrait même être transformée en puits de carbone, dans le cas où les récifs coralliens passeraient d'un stade de calcification nette à un stade de dissolution nette, ce qui bien sûr mènerait par contre à l'érosion et la disparition de ces récifs (Smith et Gattuso, 2009).

Ainsi, la description des puits de carbone bleu et de leurs éléments sensibles facilitera l'analyse de leur vulnérabilité face à l'acidification des océans.

## **Chapitre 3**

### **Analyse de la vulnérabilité des puits de carbone océaniques à l'acidification des océans**

Il est difficile de prédire avec assurance quels seront les impacts de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins et processus agissant comme puits de carbone. Certaines conséquences sont déjà connues (CDB, 2010; UNEP, 2010), d'autres sont à l'étude, et il est probable que bien d'autres soient encore à découvrir.

Cependant, à l'aide des éléments déjà connus ou en partie connus, il est possible de tenter de prévoir les effets d'un tel changement de pH sur les puits de carbone et d'évaluer leur vulnérabilité à ce phénomène. Les différents puits de carbone bleu ont une résilience différente aux changements de leur environnement (UNEP, 2009); une comparaison de leur vulnérabilité est donc nécessaire. L'évaluation de cette vulnérabilité permettra ensuite de sélectionner des mesures de conservation et de restauration appropriées pour chacun des puits. Cela permettra également de fournir aux dirigeants nationaux des arguments valables pour instaurer ces mesures pour la préservation des services écologiques rendus par ces écosystèmes (IUCN, 2009; UNEP, 2009).

#### **3.1 Sélection des critères**

La définition de vulnérabilité utilisée par la FAO dans leurs Directives internationales sur la gestion de la pêche profonde en haute mer est la suivante :

« la probabilité qu'une population, une communauté ou un habitat subisse une altération importante du fait de perturbations à court terme ou chroniques et la probabilité qu'il se rétablisse (et dans quels délais). » (FAO, 2009, p. 26)

Cependant, contrairement à la FAO qui a identifié des écosystèmes marins vulnérables (EMV) selon des critères se rapportant à leur vulnérabilité propre, les critères choisis personnellement

pour effectuer l'analyse du présent chapitre se rapportent plutôt à la vulnérabilité face à l'acidification. Ainsi, les critères sélectionnés dans cette analyse permettent de déterminer si les puits de carbone bleu possèdent des caractéristiques pouvant être affectées par un abaissement de pH océanique ou encore s'ils sont déjà fragilisés par d'autres facteurs, ce qui les rendrait plus sensibles aux modifications de pH. La pondération de ces critères permet également d'estimer l'intensité de l'impact qu'aura l'acidification sur ces puits de carbone bleu et sur leur capacité à séquestrer le carbone.

Ainsi, la valeur attribuée à chacun des critères est déterminée selon l'importance de leur influence sur la sensibilité des écosystèmes et des pompes à un abaissement de pH. Une valeur de 1 à 3 est attribuée à chaque critère, 3 représentant un critère ayant une très grande influence sur le puits, 2 représentant un critère d'influence moyenne et 1 représentant un critère ayant une influence plus faible. Plus précisément, la méthode utilisée pour attribuer la valeur à chacun des critères, lorsqu'applicable est de déterminer si l'impact de l'acidification sur ce critère est inévitable ou seulement potentiel, puis si cet impact se produit à l'échelle spécifique ou sur l'écosystème entier. Donc, une valeur de 3 est attribuée à un critère sur lequel l'acidification a un impact inévitable et sur tout l'écosystème ou la pompe, une valeur de 2 pour un impact potentiel sur tout l'écosystème ou la pompe, ou encore pour un impact inévitable spécifique, puis une valeur de 1 pour un impact potentiel spécifique. Ensuite, au cours de l'analyse, si la réponse au critère est oui, la valeur du critère sera multipliée par la note de 1. Dans le cas où la réponse au critère est non, sa valeur sera multipliée par 0; ainsi ces critères ne seront pas comptabilisés dans la note totale. Donc, le puits de carbone bleu ayant le pointage le plus élevé correspond à celui qui sera le plus vulnérable à l'acidification.

Les critères sélectionnés afin d'évaluer la vulnérabilité des puits de carbone bleu sont classés selon trois catégories. La première regroupe les critères de nature physico-chimique, la seconde regroupe les critères de nature biologique, puis la troisième regroupe les critères de fragilité.

Tout d'abord, selon la première catégorie de critère, les puits de carbone sont évalués selon qu'ils subissent une influence du système carbonate ou pas. En effet, l'acidification modifie

l'équilibre du système carbonate en diminuant la proportion d'ions carbonate et en augmentant la proportion d'ions bicarbonate (Bourque, 2010). Ainsi, si une des fonctions d'un écosystème ou d'une pompe est régie par le système carbonate, un déplacement de l'équilibre au sein de ce système aura assurément un impact sur cette fonction. Une valeur de 3 est attribuée à ce critère, puisqu'une altération importante surviendra pour un écosystème ou une pompe répondant à ce critère (Kleypas, 1999a).

Ensuite, le second critère de nature physico-chimique est un cas où les organismes d'un écosystème nécessitent un substrat de  $\text{CaCO}_3$ . Étant donné que l'acidification diminue l'état de saturation de l'aragonite ou de la calcite ( $\Omega$ ), cela entraîne la dissolution de tout matériau composé de ces minéraux calcaires (CDB, 2010). Dans un cas où une espèce nécessiterait absolument ce type de substrat pour au moins un de ses stades de vie, la dissolution du calcaire aurait un impact important sur la survie de cette espèce. La valeur attribuée à ce critère est de 2, puisque l'impact de l'acidification se situe au niveau spécifique, ce qui n'affectera pas nécessairement l'écosystème entier.

En ce qui concerne les critères de nature biologique, le premier critère cherche à déterminer si une espèce calcifiante photosynthétique est présente au sein du puits de carbone. Ces espèces qui utilisent le carbonate de calcium dissout, en état sursaturé ( $\Omega > 1$ ), afin de sécréter leur exosquelette, sont susceptibles à l'acidification. De la même manière qu'un substrat de  $\text{CaCO}_3$ , les espèces calcifiantes voient leur squelette se dissoudre lorsque l'état de saturation diminue en dessous de 1, alors en état de sous-saturation (Orr *et al.*, 2005). Ce critère se réfère à un effet agissant sur les espèces et non à l'échelle de l'écosystème, la valeur de 2 lui est donc attribuée.

Quant à lui, le second critère biologique détermine la présence d'une ou plusieurs espèces calcifiantes brouteuses au sein de l'écosystème. Ces herbivores consomment les producteurs primaires qui sont ceux qui emmagasinent à court et moyen terme le carbone organique. Un affaiblissement des organismes brouteurs favorisera la production primaire tout comme le stockage de carbone. Par contre, la perte de ces espèces se répercutera sur la chaîne trophique et modifiera potentiellement l'écosystème. Potentiellement, puisque cette niche peut être

récupérée par d'autres espèces brouteuses et le réseau trophique de l'écosystème ne s'effondrerait donc pas avec certitude. Ce critère se voit attribuer une valeur de 1.

Par la suite, le troisième critère biologique concerne la présence d'une espèce calcifiante clé, c'est-à-dire une espèce qui a une importance disproportionnée pour le maintien de l'équilibre d'un écosystème (OQLF, 2012a). L'affaiblissement physiologique de la population d'une de ces espèces est une menace importante pour la survie d'un écosystème, c'est pour cette raison que ce critère a une valeur de 3.

Le quatrième critère biologique évalue la diversité du système. Les études ont démontré que l'acidification simplifie la biodiversité d'un écosystème (Kroeker *et al.*, 2011). La FAO utilise également comme critère de vulnérabilité la complexité structurelle d'un milieu (FAO, 2009). La simplification d'un système d'une grande diversité aura pour conséquence un déséquilibre auquel les communautés pourraient ne pas pouvoir s'adapter, menaçant ainsi la survie de l'écosystème. Une valeur de 1 est attribuée à ce critère étant donné qu'il se réfère à un effet indirect de l'acidification sur les écosystèmes.

Les derniers critères se réfèrent à la fragilité des puits de carbone bleu, une fragilité spécifique ou alors une fragilité induite par des facteurs externes, propre à un certain type d'écosystème par ses caractéristiques. La résilience des puits de carbone par rapport à l'acidification peut donc être affaiblie avec une intensité différant selon le facteur fragilisant.

Le critère de fragilité spécifique est l'existence de plusieurs facteurs environnementaux limitants. Lorsque l'intervalle de survie d'une espèce par rapport à un facteur environnemental est étroit, des variations environnementales, même faibles, pourront porter atteinte à la survie de cette espèce, dite sténoèce (OQLF, 2012b). Dans un cas où la ou les espèces ayant de telles limites sont à la base de la chaîne alimentaire et celles qui créent un habitat, leur disparition potentielle peut porter atteinte à tout l'écosystème. Une valeur de 2 est donc attribuée à ce critère, puisque bien que l'effet puisse être à l'échelle de l'écosystème, il reste potentiel.

Par la suite, le premier critère de fragilité induite établi si le puits de carbone est perturbé par des activités de nature anthropique. Des exemples de ces perturbations seraient la surpêche, la pollution, le dragage, le tourisme, le développement urbain en zone côtière, ainsi que la transformation des écosystèmes côtiers en fermes d'aquaculture. De telles perturbations affaiblissent la résistance des écosystèmes face à une nouvelle perturbation comme l'abaissement du pH de l'eau de mer. Étant donné que ces activités menacent elles-mêmes la survie des puits de carbone océanique, avec de forts pourcentages de destruction (UNEP, 2009), une valeur de 3 est accordée à ce critère.

Finalement, le dernier critère concerne une fragilité induite par des perturbations climatiques étant, tout comme l'acidification des océans, des conséquences à l'augmentation de la concentration atmosphérique du gaz carbonique. Des exemples de ces perturbations seraient le réchauffement des eaux de surface, la hausse du niveau des mers, des variations de salinité, la modification des patrons de précipitation et l'intensification des tempêtes (GIEC, 2007). De telles perturbations peuvent affaiblir les puits de carbone bleu et diminuer leur résistance à l'acidification, sans toutefois nécessairement détruire ces écosystèmes côtiers avec autant d'occurrences que les perturbations anthropiques. Une valeur de 2 est donc attribuée à ce critère.



### 3.2 Grille d'évaluation

Le tableau 3.1 est une grille d'évaluation à critères pondérés qui évalue la vulnérabilité des puits de carbone bleu par rapport à l'acidification des océans. Les critères sont regroupés par catégories, selon qu'ils soient des critères de type physique, biologique ou de fragilité. La valeur, ou la pondération, de chaque critère est indiquée dans la case à droite du critère. La note attribuée à chaque puits de carbone bleu est indiquée dans chaque grande case dans la colonne sous le puits. Dans la petite case est indiquée la cote de vulnérabilité des puits par critère, si elle est différente de 0. Pour chaque puits, la somme de toutes les cotes de la colonne résulte en une cote totale de vulnérabilité, qui sera interprétée à la section suivante.

**Tableau 3.1 Grille d'évaluation de la vulnérabilité des puits de carbone bleu à l'acidification.** (Valeur des critères : 3 = grandement susceptible à l'acidification, 2 = moyennement susceptible à l'acidification, 1= faiblement susceptible à l'acidification. Note de 1 = la présence d'un critère, note de 0 = l'absence d'un critère. La cote de vulnérabilité individuelle = produit de la valeur du critère par sa note La cote de chaque critère est indiquée dans le petit carré si  $\neq 0$ . Une cote de vulnérabilité totale d'un puits de carbone bleu de 0 = pas vulnérable à l'acidification; de 1 à = peu vulnérable; de 6 à 10 = plutôt vulnérable; de 11 à 15 = fortement vulnérable; de 16 à 19 = extrêmement vulnérable.)

Critères			Pompe de solubilité	Pompe biologique	Marais salés	Prairies côtières	Forêts de mangroves	Forêts de macro-algues	Récifs coralliens
Physiques	Influencé par le système carbonate	3	3 1	3 1	0	0	0	0	3 1
	Substrat de CaCO <sub>3</sub>	2	0	0	0	0	0	0	2 1
	Sous-total cote physique		3	3	0	0	0	0	5
Biologiques	Présence d'espèce calcifiante photosynthétique	2	0	2 1	0	0	0	2 1	2 1
	Présence d'espèce calcifiante brouteuse	1	0	1 1	1 1	1 1	0	1 1	1 1
	Présence d'espèce clé calcifiante	3	0	3 1	0	0	0	0	3 1
	Système diversifié	1	0	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1
	Sous-total cote biologique		0	7	2	2	1	4	7
Fragilité	Limité par plusieurs facteurs environnementaux	2	2 1	2 1	2 1	0	2 1	2 1	2 1
	Pressions anthropiques	3	0	0	3 1	3 1	3 1	3 1	3 1
	Perturbations climatiques	2	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1
	Sous-total cote de fragilité		4	4	7	5	7	7	7
Cote de vulnérabilité			7	14	9	7	8	11	19

### 3.3 Cote de vulnérabilité

L'évaluation des puits de carbone bleu selon les critères physico-chimiques, biologiques et de fragilité a permis d'obtenir une cote de vulnérabilité par rapport à l'acidification des océans. En comparant ces cotes avec l'importance de chaque puits quant à la séquestration du carbone, tel que présenté au tableau 3.2, il est possible d'identifier les puits de carbone bleu les plus préoccupants, toujours du point de vue de la séquestration du carbone. Par exemple, il est possible de remarquer rapidement que le processus de la pompe biologique est le puits de carbone le plus préoccupant, étant donné sa cote de 14 et l'importante quantité de carbone qu'il permet de stocker à long terme. Quant au processus de pompe de solubilité, c'est le puits qui stocke le plus de carbone, mais sa vulnérabilité face à l'acidification ne semble pas catastrophique. Les marais salés, les prairies côtières, les forêts de mangroves, puis potentiellement les forêts de macro-algues sont tous des puits de carbone importants à préserver, et leur cote de vulnérabilité annonce qu'il est toujours possible d'agir en ce sens. Enfin, les récifs coralliens, bien que considérés des sources de carbone, d'où la valeur négative de stockage du carbone, sont extrêmement vulnérables à l'acidification et leur préservation est prioritaire.

**Tableau 3.2 Présentation des puits de carbone bleu selon leur vulnérabilité à l'acidification des océans, avec la quantité du carbone séquestré par chaque puits, en Tg C/an.** (En orange foncé = les puits extrêmement vulnérables; orange moyen = les puits fortement vulnérables; orange pâle = les puits plutôt vulnérables.)

Puits de carbone	Cote de vulnérabilité	Vulnérabilité	Stockage global en Tg C/an
Récifs coralliens	19	Extrêmement	-50
Pompe biologique	14	Fortement	500
Forêts de macro-algues	11	Fortement	15 à 39
Marais salés	9	Plutôt	60,4 à 70
Forêts de mangroves	8	Plutôt	17 à 23
Pompe de solubilité	7	Plutôt	2 000 ± 700
Prairies côtière	7	Plutôt	27,4 à 44

Source : IUCN (2009). p. 33 et 43; UNEP (2009). p. 39; CDB (2010). p.13

Afin de connaître les éléments sur lesquels il est encore possible d'agir afin de préserver chacun de ces puits, le détail des composantes qui contribuent à leur vulnérabilité est présenté dans la présente section.

### **3.3.1 Pompe de solubilité**

La pompe de solubilité a obtenu une cote de vulnérabilité de 7, ce qui signifie que ce puits de carbone est plutôt vulnérable à l'acidification des océans. Ceci est entre autres dû à l'influence du système carbonate sur le fonctionnement de cette pompe. En effet, le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère peut se dissoudre dans l'eau de mer lorsque la pression partielle du  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) de l'air est plus élevée que la  $p\text{CO}_2$  de l'eau. La  $p\text{CO}_2$  de l'eau dépend de l'équilibre du système carbonate et est abaissé lorsque le  $\text{CO}_2$  dissous est transformé en ions bicarbonates, puis en ion carbonate. Ce processus du système carbonate permet de dissoudre plus de  $\text{CO}_2$  atmosphérique dans l'océan. En d'autres mots, la solubilité du  $\text{CO}_2$  dépend de l'alcalinité des eaux de surface.

De plus, le processus de pompe de solubilité est limité par plusieurs facteurs environnementaux, soit la  $p\text{CO}_2$  de l'eau et la température pour la dissolution du  $\text{CO}_2$  à l'interface eau-air et la densité de l'eau, qui dépend de la température et de la salinité, et les courants océaniques pour la circulation thermohaline. Ainsi, les perturbations climatiques dues aux changements globaux ont un impact sur le fonctionnement de ce puits, telles le réchauffement des eaux de surface, l'abaissement de la salinité par la fonte des glaciers, puis la modification des courants océaniques en raison d'un changement du régime des vents et des précipitations.

### **3.3.2 Pompe biologique**

La pompe biologique a obtenu une cote de 14, ce qui signifie que ce puits de carbone est fortement vulnérable à l'acidification des océans. Tout d'abord, la pompe biologique est influencée par la nécessité des organismes calcifiants participants au processus de pompe biologique de se trouver au-dessus de l'horizon de saturation de l'aragonite et de la calcite.

L'alcalinité totale au-dessus de cet horizon reçoit une contribution d'ions calcium et carbonate par le processus de la contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$ . Ainsi, la pompe biologique et le système carbonate océanique sont en boucle de rétroaction, signifiant que si l'un des deux est déséquilibré par l'acidification, l'autre en subira nécessairement l'impact.

Ensuite, certaines de ces espèces calcifiantes sont des espèces photosynthétiques, comme les coccolithophores qui participent directement à la capture du  $\text{CO}_2$  pour le transformer en carbone organique, tout en utilisant les ions carbonates pour former leur plaque de calcite. Ces espèces sont transférées sous la zone photique en coulant ou en étant consommées par les herbivores, transportant ainsi le carbone vers les fonds océaniques. Les espèces calcifiantes photosynthétiques sont d'importants contributeurs à la pompe de carbone organique et à la contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$ ; leur vulnérabilité à l'acidification impacte ainsi tout le processus de pompe biologique.

Cette conclusion est également valable pour les espèces calcifiantes brouteuses contribuant à la pompe biologique en permettant le transfert du phytoplancton et du carbone organique sous la zone photique et vers le fond de l'océan. Des espèces de foraminifères et de *thecosomata*, lors de leur mort, coulent vers les fonds océaniques où leur squelette calcaire se dissout, contribuant au carbone inorganique qui remonte en surface par les mouvements d'*upwelling*.

En considérant la contre-pompe de carbone inorganique en tant que composante essentielle au processus de pompe biologique, il est possible d'affirmer que les espèces calcifiantes contribuant à cette contre-pompe sont des espèces clés. Ainsi, si la persistance de ces espèces est compromise, le processus de contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$  qui joue un rôle important dans le contrôle de l'alcalinité en surface est lui-même compromis.

La chaîne trophique pélagique est un système diversifié, dont les classes d'organismes varient selon la profondeur et la distance de la côte. La richesse spécifique est en général plus élevée en zone néritique, c'est-à-dire au-dessus du plateau continental, et en zone photique (Karleskint *et al.*, 2010). Malgré tout, on retrouve en zone océanique divers poissons, mammifères, reptiles et oiseaux marins, des mollusques, des cnidaires et des urochordés, ainsi

que du plancton de type phytoplancton, zooplancton, bactérioplancton et virioplancton (Karleskint *et al.*, 2010). Cette biodiversité, en plus de contribuer à la valeur de ce système, augmente la complexité du réseau trophique. Étant donné que l'acidification simplifie la diversité (Kroeker *et al.*, 2011), ce système complexe sera plus fortement impacté par ce phénomène qu'un système plus simple.

Le processus de pompe biologique est restreint par suffisamment de facteurs limitants pour être considéré fragile. En effet, la croissance planctonique est limitée par les nutriments, en particulier le fer, ainsi que par la lumière. L'apport en nutriment ainsi que le processus de contre-pompe de  $\text{CaCO}_3$  dépend des mouvements d'*upwelling*, puis le *fitness* et le ballast des espèces calcifiantes dépendent de l'état de saturation de l'aragonite et de la calcite. Les pressions anthropiques imposées aux espèces pélagiques de la zone océanique, c'est-à-dire la surpêche, ne sont pas considérées en tant que facteurs fragilisant ce système. Bien que certaines de ces espèces, telles les baleines, contribuent à l'apport de nutriment, la diminution de leur importance n'altérera pas le processus de pompe biologique. Pour cette raison, ce critère est considéré comme nul.

Néanmoins, ce puits de carbone est fragilisé par de multiples perturbations climatiques résultant des changements globaux. Afin d'éviter les eaux de surface qui se réchauffent, une migration de certaines espèces vers les pôles ou plus en profondeur est observable, ce qui peut compromettre le processus de la pompe. Le réchauffement des eaux en surface augmente la stratification, augmentant les barrières pour le transfert du carbone organique vers le fond marin. Également, les mouvements d'*upwelling*, nécessaires à la contre-pompe de carbone inorganique et à l'apport de nutriments en zone photique et néritique, sont compromis par la modification du régime des vents, de même que par les changements de température et de salinité des eaux. En plus d'affecter la production primaire du phytoplancton, ces perturbations de courants marins pourront affecter la production des écosystèmes côtiers.

Ce puits de carbone bleu fortement vulnérable à l'acidification océanique est d'une importance considérable quant au stockage de carbone, soit 0,5 Pg C/an à long terme. De tous les puits de

carbone bleu analysés, c'est le plus préoccupant, compte tenu de sa forte vulnérabilité et de l'importance des quantités de carbone séquestrées.

### **3.3.3 Marais salés**

Les marais salés ont obtenu une cote de 9, ce qui signifie que ce puits de carbone bleu est plutôt vulnérable à l'acidification des océans. Les critères témoignant de cette vulnérabilité sont la présence d'espèce calcifiante brouteuse et un système diversifié, des limites imposées par plusieurs facteurs environnementaux, pressions anthropiques, puis des perturbations climatiques.

D'abord, les espèces de gastéropodes brouteuses dans les marais salés peuvent être affectées par l'abaissement du pH de l'eau. Ces herbivores exercent un contrôle sur les producteurs primaires et servent de source d'alimentation pour maintenir la biodiversité présente. Cette biodiversité, bien qu'elle semble pauvre, surtout du point de vue végétal, est au contraire assez riche. Du point de vue faunique, par exemple, on retrouve une variété de poissons, d'avifaune, d'invertébrés tels des bivalves, des gastéropodes, des crustacés, ainsi que beaucoup de bactéries présentes dans la vase (Boorman, 1999).

Ensuite, ces écosystèmes marins sont soumis à des facteurs les fragilisant, ce qui réduit leur tolérance à l'acidification. Pour débiter, plusieurs facteurs environnementaux limitent la répartition de ces puits de carbone. Ces milieux se développent dans l'espace intertidal, dans des endroits protégés des vagues et du vent, de faible profondeur et où il y a des sédiments fins en suspension. Puis, des pressions anthropiques comme la transformation de ces marais en terres cultivées, le développement urbain, la pollution de métaux lourds et l'eutrophisation réduisent leur distribution géographique et leur résistance face à d'autres menaces. Finalement, des perturbations climatiques pourraient menacer la survie des marais salés, par exemple une augmentation du niveau des mers réduira la zone intertidale disponible pour ces écosystèmes, puis l'intensification et l'augmentation du nombre de tempêtes pourra éroder les côtes et le substrat (Boorman, 1999).

### 3.3.4 Prairies côtières

Les prairies côtières, aussi nommées herbiers marins, ont obtenu une cote de 7, ce qui signifie qu'elles sont plutôt vulnérables à l'acidification de l'eau. La vulnérabilité se situe au niveau des aspects biologiques et des facteurs fragilisant l'écosystème.

Cette vulnérabilité provient d'abord de la présence d'espèces calcifiantes brouteuses au sein de ces écosystèmes, comme des oursins, des crustacés, puis des gastéropodes. Ces espèces contrôlent la répartition des herbiers marins par leur broutage, et bien qu'elles consomment la biomasse vivante qui compte pour une partie du carbone stocké, leur importance dans la chaîne alimentaire des prairies côtières fait en sorte que leur vulnérabilité à l'acidification compte dans la balance de la vulnérabilité de l'écosystème entier.

En ce qui concerne la biodiversité, les prairies côtières recèlent une grande richesse spécifique. Selon la latitude où se retrouvent ces écosystèmes, les producteurs primaires peuvent appartenir à une seule espèce en régions tempérées, ou alors peuvent être polyspécifiques en régions tropicales (Bach *et al.*, 1998). La diversité faunique quant à elle comprend de nombreuses espèces de mammifères, d'oiseaux, d'échinidés, de crustacés et de gastéropodes, dont plusieurs sont des herbivores (Phillips et Meñez, 1988). La complexité de ces écosystèmes pourrait diminuer la résilience face à des changements environnementaux.

Les herbiers marins sont fragilisés par des pressions anthropiques, par exemple la pollution causant l'eutrophisation stimule la croissance de plantes épiphytes et d'algues flottantes qui bloqueront la lumière pour les herbes marines. Les populations humaines font aussi la récolte de ces végétaux pour divers usages, tout comme ils pratiquent la pêche de subsistance, mais également la surpêche commerciale.

Le développement de ces prairies côtières dépend de la lumière reçue, et donc de la profondeur et de la turbidité de l'eau. Ainsi, la hausse prévue du niveau des mers, de même que l'augmentation de la force et du nombre d'événements climatiques extrêmes sont des perturbations climatiques qui pourraient bien nuire à ces puits de carbone et les fragiliser.



### 3.3.5 Forêts de mangroves

Les forêts de mangroves ont obtenu une cote de 8, ce qui signifie que ces forêts côtières sont plutôt vulnérables à l'acidification des océans. Ces écosystèmes ne comprennent pas de facteurs physico-chimiques qui pourraient être affectés par une baisse du pH, mais comprennent des facteurs biologiques qui peuvent l'être, de même que des facteurs fragilisant leur résistance face à ce changement environnemental.

En fait, sur l'aspect physico-chimique, il serait même possible que l'acidification ait des effets positifs, car il a été reconnu que les sédiments dans les forêts de mangroves sont naturellement acides et qu'ainsi la sédimentation pourrait être favorisée par un abaissement de pH de l'eau (Ayukai, 1998). Néanmoins, les effets positifs liés à l'acidification ne sont pas évalués dans cette présente analyse.

Les facteurs biologiques qui pourraient être affectés par l'acidification sont peu nombreux. En fait, les espèces calcifiantes au sein de ces forêts ne sont ni photosynthétiques, ni brouteuses et ni des espèces clés. Les espèces calcifiantes benthiques sont plutôt filtreuses, détritivores ou carnivores. Les espèces de crustacés, de mollusques, de cnidaires et d'éponges qui comportent des composantes structurelles calcaires et qui seront affectés par une acidification ont une influence sur la vulnérabilité des mangroves au niveau de la diversité de la communauté. Étant donné que l'acidification est reconnue pour simplifier la biodiversité d'un écosystème (Kroeker *et al.*, 2011), cette modification affectera les liens trophiques et la résilience de cet habitat composé de plusieurs taxons de producteurs primaires (Gattuso *et al.*, 1998). Ces forêts abritent aussi de nombreuses espèces d'oiseaux, d'insectes, de reptiles, de poissons, de mollusques, de crustacés, de cnidaires, d'éponges, mais également plusieurs mammifères comme certaines espèces de singes, des tigres et des cerfs (Polidoro *et al.*, 2010).

Les facteurs contribuant le plus à la vulnérabilité des forêts de mangroves à l'acidification sont les facteurs fragilisant ces écosystèmes. D'abord, le développement de ces forêts nécessite plusieurs facteurs environnementaux particuliers. Bien que les palétuviers soient adaptés aux

variations environnementales et tolérantes au sel, les plantules nécessitent un substrat vaseux pour s'y enraciner, en zone peu profonde et à l'abri de la houle. De plus, les arbres matures résistent mieux à une salinité qui ne subit pas de grandes variations (Polidoro *et al.*, 2010).

Ensuite, les forêts de mangroves subissent de grandes pressions anthropiques qui ont réduit leur distribution à la moitié de leur distribution originale (IUCN, 2009). Les populations humaines traditionnellement récoltaient du bois, de la tourbe, des espèces fauniques, sans toutefois compromettre la survie de ces forêts. Par contre, on les transforme maintenant en marais salants ou en bassins d'aquaculture. La technique d'élevage de crevette utilisée est la plus grande menace pour ces écosystèmes. Le développement urbain contribue également à leur destruction, de même que la construction de barrages, les marées noires et la pollution chimique (Dawes *et al.*, 1999; Gattuso *et al.*, 1998).

Finalement, des perturbations climatiques peuvent aussi contribuer à l'affaiblissement de la résistance de ces forêts côtières. Étant situés en zone intertidale, les palétuviers sont adaptés aux marées. Par contre, la hausse du niveau des mers peut réduire l'espace disponible pour ces forêts, surtout dans les zones où le développement urbain a atteint la côte, empêchant un déplacement de l'écosystème vers l'intérieur des terres. De plus, ces forêts côtières sont reconnues pour leur service de protection des côtes contre les tempêtes tropicales et les vagues. Par contre, lors des événements climatiques extrêmes, dont l'occurrence augmentera, les arbres sont souvent abimés et des forêts entières peuvent être détruites.

### **3.3.6 Forêts de macro-algues**

Les forêts de macro-algues ont obtenu une cote de 11, ce qui signifie qu'elles sont fortement vulnérables à l'acidification des océans. Ce sont des composantes biologiques puis des facteurs fragilisants qui contribuent à la vulnérabilité de ces forêts subaquatiques.

Ces forêts sont parfois occupées par des types de producteurs primaires autres que les macroalgues, par exemple des algues corallines encroûtantes calcaires. Même si ces algues ne sont pas les producteurs primaires principaux, elles contribuent à la séquestration du carbone

totale de ce puits de carbone bleu. Leur disparition diminuerait ainsi la quantité totale de carbone stocké dans cet écosystème.

En plus de ces espèces d'algues, des espèces calcifiantes brouteuses sont présentes dans l'écosystème, tel que des oursins et des gastéropodes. L'espèce clé de ces écosystèmes, les loutres de mer (*Enhydra lutris*), exerce un contrôle sur les oursins et contribue à la prolifération des macroalgues (Estes et Duggins, 1995). Ainsi, la susceptibilité à l'acidification des oursins et d'autres herbivores calcifiants qui s'alimentent de macro-algues pourraient être bénéfique pour la production primaire de ces écosystèmes. Toutefois, les herbivores contribuent également en grande partie à la complexité de la chaîne trophique puis à la biodiversité présente. Effectivement, ces forêts abritent une diversité d'espèces d'invertébrés, de poissons, d'hydroïdes, de gastéropodes, de mollusques, d'échinodermes, de coraux solitaires, puis de mammifères marins (Steneck *et al.*, 2002). Cette diversité peut être simplifiée par l'acidification et modifier les liens trophiques de cet écosystème.

Ce puits de carbone peut aussi être fragilisé par plusieurs facteurs environnementaux qui limitent sa distribution et sa productivité. Les macroalgues se développent dans des environnements à substrat rocheux, à une profondeur où la lumière atteint le fond, dans des températures froides avec une concentration élevée de nutriments (Graham *et al.*, 2007). Quant aux pressions anthropiques, la principale est la surpêche. Lorsque les prédateurs sont retirés de l'écosystème, les herbivores peuvent proliférer et dévorer les macroalgues, jusqu'à détruire complètement l'écosystème.

Finalement, les perturbations climatiques qui fragilisent les forêts de macro-algues sont le réchauffement des eaux de surface qui augmente la stratification de la colonne d'eau et cause une diminution de l'apport de nutriment pour les algues. De plus, la hausse du niveau de l'eau risque de diminuer l'apport de lumière et ainsi diminuer la production primaire. Puis, les tempêtes peuvent arracher les algues de leur substrat; ce risque est augmenté par l'amplification des tempêtes et l'accroissement de leur nombre.

### 3.3.7 Récifs coralliens

Les récifs coralliens ont obtenu une cote de 19, soit la cote la plus élevée, ce qui signifie qu'ils sont extrêmement vulnérables à l'acidification des océans. Ces écosystèmes répondent à tous les critères de vulnérabilité. D'ailleurs, beaucoup de récifs sont menacés de ne plus être viables d'ici au milieu du siècle (Orr *et al.*, 2009).

Tout d'abord, la calcification des coraux est influencée par le système carbonate, puisque pour que le taux de calcification soit supérieur à la dissolution de l'aragonite, l'état de saturation de l'aragonite doit être supérieur à 1. Également, les récifs coralliens créés par les coraux hermatypiques servent de substrat aux coraux ainsi qu'aux autres organismes benthiques de l'écosystème. Ce substrat de  $\text{CaCO}_3$ , de la même manière que les squelettes des coraux, sera dissout en condition plus acide, où l'état de l'aragonite est sous-saturé.

Ensuite, les récifs coralliens comprennent des espèces calcifiantes photosynthétiques, dont la production primaire peut être affectée par l'acidification. En réalité, les coraux ne sont pas des espèces photosynthétiques; ce sont plutôt les algues zooxanthelles, en symbiose avec les coraux, qui effectuent la production primaire. Néanmoins, sans cette symbiose, la productivité est grandement réduite (Enríquez *et al.*, 2005). Également, d'autres producteurs primaires contribuent au stockage de carbone dans ce type d'écosystème, entre autres des algues corallines calcaires, qui peuvent aussi être affectées par l'acidification.

De plus, les récifs coralliens sont une source de nourriture pour les organismes brouteurs calcifiants comme des mollusques, qui peuvent se nourrir d'une diversité d'algues présentes parmi la diversité benthique de ces récifs. Des ophiuridés peuvent aussi consommer de grande quantité de coraux, allant parfois jusqu'à la destruction d'un récif lorsqu'une espèce est invasive. Ainsi, ces organismes calcifiants et susceptibles à l'acidification, exercent une pression sur les producteurs primaires et peuvent donc être considérés nuisibles au stockage de carbone. Ils sont cependant une part importante du réseau trophique de ces écosystèmes diversifiés. Également, étant donné que les coraux effectuent de la calcification qui libère du

carbone et ne sont donc pas réellement des organismes séquestreurs de carbone, leurs prédateurs ne sont pas entièrement nuisibles au stockage de carbone.

Le critère suivant évalue la présence d'espèce clé calcifiante dans l'écosystème corallien. Évidemment, les coraux sont l'espèce clé de ces écosystèmes, puisqu'ils créent eux-mêmes leur habitat par leur calcification. Cette propriété contribue donc encore plus à la vulnérabilité des récifs à un abaissement de pH de l'eau de mer.

Quant à la diversité des récifs coralliens, ceux-ci sont connus pour être parmi les écosystèmes avec la plus grande richesse spécifique (Veron, 2000). Cette biodiversité confère une grande complexité à la communauté récifale, qui sera assurément simplifiée par l'acidification océanique (Kroeker *et al.*, 2011). La résilience de l'écosystème sera affaiblie dans un cas de simplification importante.

Les récifs coralliens ont une distribution géographique restreinte par de nombreux facteurs environnementaux limitants. Ils nécessitent une luminosité suffisante pour effectuer la photosynthèse, une température optimale pour leur calcification, un intervalle restreint de salinité, un substrat rocheux ou calcaire pour s'implanter et une sursaturation de l'aragonite ( $\Omega > 1$ ). De plus, il est préférable que les coraux soient dans un environnement à faible turbidité, puisque les débris qui se déposent sur les polypes leur coûtent énormément d'énergie pour se maintenir déterrés. Également, les récifs coralliens se développent mieux à l'abri des vagues et des courants, qui sont tout de même bénéfiques pour l'apport de nutriments, dans la limite où la force du mouvement de l'eau n'abîme pas les coraux (Osborne, 2000).

Les récifs coralliens sont en plus fragilisés par des perturbations anthropiques variées. Des activités touristiques peuvent déclencher un stress pour les coraux et les habitants des récifs, comme la collecte d'espèces et la circulation nautique. D'autres pressions telles la surpêche, le dragage et la pollution peuvent nuire à la survie des récifs, en particulier lorsque des perturbations comme l'acidification surviennent.

Pour terminer, plusieurs perturbations climatiques risquent d'avoir un impact négatif sur la résistance des écosystèmes coralliens. Puisqu'autant de facteurs environnementaux limitent la croissance et la distribution des récifs, les perturbations climatiques qui peuvent modifier ces facteurs auront toutes une influence fragilisante sur ces écosystèmes. Le réchauffement des eaux de surface peut occasionner le blanchiment des coraux puis leur mort. La salinité peut être modifiée par l'ajout d'eau douce en raison de la fonte des glaciers ou encore par une plus forte évaporation de l'eau contenue dans des lieux restreints. Une modification du patron de précipitation peut nuire à la photosynthèse par une augmentation potentielle de l'ennuagement, en plus des fortes pluies qui peuvent abimer les coraux, tout comme l'intensification des tempêtes. Puis, la répartition géographique des coraux peut être changée par la modification des courants marins et la hausse du niveau des mers (Osborne, 2000).

Puisque ces écosystèmes sont considérés en tant que faibles sources de carbone, leur dégradation pourrait être bénéfique pour l'alcalinité totale des eaux de surface et donc pour la dissolution du carbone atmosphérique. Cependant, leur disparition implique une perte importante d'un refuge pour la biodiversité marine et de services écologiques de grande valeur. Ces pertes seraient trop importantes pour souhaiter la dégradation de ces écosystèmes (Veron, 2000). Leur protection doit donc être priorisée, dans la mesure du possible, compte tenu des nombreux facteurs les menaçant.

## **Chapitre 4**

### **Différentes options pour la conservation des puits de carbone océaniques**

Pour faire suite à l'analyse de vulnérabilité des puits de carbone bleu à l'acidification effectuée au chapitre précédent, il est nécessaire d'identifier les stratégies de conservation et de restauration pour ces écosystèmes qui jouent un rôle si important pour le climat terrestre. Toutefois, la meilleure stratégie à appliquer varie selon les puits et leur statut. Les différentes options pouvant être utilisées pour préserver ces écosystèmes seront envisagées dans ce présent chapitre afin d'identifier celles qui seront les mieux adaptées pour ces puits de carbone. Par contre, il faut avant tout discuter des efforts à mettre pour la conservation de certains de ces écosystèmes côtiers ainsi que de la pertinence de ces efforts dans un contexte de forte vulnérabilité à l'acidification. Par la suite, il est nécessaire de se donner les moyens d'appliquer les stratégies de protection sélectionnées, c'est-à-dire élaborer une solide argumentation utilisant les principes d'économie environnementale. Cette approche servira à réfuter les discours qui opposent économie et environnement, et ainsi de convaincre les gouvernements de réguler et financer les mesures de protection des écosystèmes séquestrant le carbone.

#### **4.1 Les puits de carbone prioritaires à conserver**

Grâce à l'analyse de vulnérabilité effectuée au chapitre précédent, il a été possible d'identifier quels critères ont une influence sur la vulnérabilité des puits de carbone par rapport à l'acidification des océans. Ainsi, s'il est possible d'agir sur certains de ces critères, il est possible de contribuer à la préservation des puits de carbone bleu en éliminant ces facteurs de perturbation. Le facteur à enrayer étant le plus réalisable est celui des perturbations anthropiques, puisque la simple création d'un statut de protection légal peut éliminer certaines de ces actions nuisibles. De cette manière, les écosystèmes soumis à de telles perturbations

peuvent devenir plus résilients à l'acidification et ont une plus grande chance de maintenir leur rôle de puits de carbone.

Bien entendu, certains facteurs contribuant à la vulnérabilité des puits de carbone sont éliminables seulement par l'arrêt des émissions de GES au taux actuel. Les nombreuses conséquences des changements climatiques sont des facteurs qui affaiblissent les écosystèmes possédant, justement, la capacité de ralentir ces changements climatiques. Cette boucle rétroactive peut néanmoins être éliminée si le taux de CO<sub>2</sub>eq atmosphérique est abaissé à un niveau se rapprochant du niveau préindustriel, soit 280 ppm (GIEC, 2007). La diminution de la concentration de CO<sub>2</sub>eq, si elle n'est pas provoquée par un changement drastique du mode de vie des humains à l'échelle planétaire, pourrait encore être aidée significativement par la protection et la restauration des puits de carbone naturels, d'où l'importance et l'urgence pour chaque pays d'adopter des mesures de conservation de ces écosystèmes côtiers. La diminution du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique ralentirait et pourrait même arrêter le processus d'acidification, ce qui rendrait les puits de carbone bleu encore plus forts pour résister à leurs autres menaces.

Toutefois, en se basant sur l'analyse de vulnérabilité, quels sont les puits de carbone qu'il vaudrait mieux conserver? Tout d'abord, il est évident qu'il sera plus aisé d'appliquer des mesures de conservation efficaces pour les écosystèmes les moins vulnérables, puisque moins de facteurs de vulnérabilités doivent être éliminés. Les puits de carbone bleu les moins vulnérables sont la pompe de solubilité, les marais salés, les prairies côtières et les forêts de mangroves. La somme du carbone séquestré annuellement par tous ces puits de carbone est de 2 137 Tg C/an; leur conservation contribuera nécessairement à un retour vers une alcalinité plus élevée et potentiellement plus viable pour les écosystèmes marins.

Néanmoins, cela ne signifie pas que les puits de carbone étant les plus vulnérables à l'acidification ne doivent pas être objets à des efforts de conservation. En effet, ce sont ces puits qui nécessitent le plus une intervention législative pour leur protection. Bien que ces écosystèmes et processus subissent une plus forte pression provenant de diverses sources, les pressions anthropiques comptent pour une portion importante de cette vulnérabilité. Puisque les mesures de protection légale agissent principalement pour éliminer les effets des activités



anthropiques sur les écosystèmes, elles permettraient de diminuer la vulnérabilité de certains puits de carbone et ainsi d'être plus résilients aux menaces sur lesquelles il est plus difficile d'agir, telles l'acidification et les perturbations climatiques. Ceci est valable par exemple pour les forêts de macro-algues. L'élimination du critère de fragilité dû aux pressions anthropiques pour ce type d'écosystème côtier diminuerait sa cote de vulnérabilité à 8, lui fournissant une viabilité plus probable et l'opportunité de maintenir son action de séquestration du carbone.

Par contre, dans le cas de certains puits de carbone, telle la pompe biologique, des mesures de protection ou de gestion sont plus difficilement applicables, puisque ce processus n'est pas une unité physique aux délimitations définies. Toutefois, des expérimentations sont en cours afin d'observer la faisabilité des mesures artificielles en géo-ingénieries pour augmenter l'efficacité de la production primaire océanique, et donc maintenir le fonctionnement de la pompe biologique et sa capacité de séquestration du carbone. Par exemple, ces mesures consistent à fertiliser l'océan en distribuant des nutriments limitant la croissance planctonique, tels le fer, l'azote, l'urée et le phosphate (Coale *et al.*, 1996; Lenton et Vaughan, 2009; Karl et Letelier, 2008).

Quant aux récifs coralliens, qui sont les plus enclins à disparaître à cause de l'acidification, les moyens pour les protéger pourraient être une combinaison de mesures de protection légales contre les activités anthropiques nuisibles et des mesures de restauration. Évidemment, le meilleur moyen pour préserver ces écosystèmes d'une grande richesse spécifique serait de remédier à l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais en attendant ce miracle, les mesures proposées précédemment pourront aider ces récifs à survivre.

## **4.2 Mesures de conservation**

Diverses options peuvent être envisagées pour la préservation des puits de carbone bleu. Il est évident que ces options sont plus facilement applicables pour des puits aux délimitations déterminées. Quant aux processus agissants comme puits de carbone, tels la pompe de solubilité et la pompe biologique, peu d'options semblent pouvoir s'appliquer pour les protéger de perturbations externes. En effet, ces processus se produisent dans tout l'océan,

dans un espace trop vaste pour appliquer un quelconque contrôle. Il est donc difficile de mettre en place un statut de protection qui s'appliquerait normalement pour une unité physique définie. Par contre, certaines solutions ont été testées pour renforcer l'efficacité de la pompe biologique, comme l'ajout dans l'océan Pacifique de fer, élément limitant la croissance du phytoplancton (Coale *et al.*, 1996). Des efforts de recherche doivent toutefois être maintenus afin de confirmer l'efficacité des solutions pour contrer les menaces des pompes de solubilité et biologiques, qui sont les puits les plus importants quantitativement.

Quant aux puits de carbone bleu ayant une délimitation déterminée, des mesures de protection et de restauration peuvent plus facilement s'appliquer pour contrer certaines de leurs menaces. Certaines perturbations anthropiques peuvent notamment être éliminées par l'attribution d'un statut de protection légal, tel la création d'aires marines protégées. Dans d'autres cas, par exemple lorsque la survie des populations locales dépend des ressources soutirées de l'écosystème, la mise en place d'une gestion intégrée peut s'avérer une meilleure solution. Les différentes mesures pouvant être appliquées pour la conservation des puits de carbone bleu sont énumérées au tableau 4.1, puis décrites dans les sections 4.2.1 et 4.2.2.

Afin de bien planifier la protection des zones côtières captatrices de carbone, il serait utile de créer un document servant de marche à suivre décisionnelle pour la mise en place des mesures de conservation et de restauration, s'appliquant à l'échelle internationale. Ce document rassemblerait les étapes pour déterminer la priorité de conservation des puits de carbone bleu, de même que le potentiel de restauration de ceux qui ont été dégradés. La priorisation des sites à restaurer est également nécessaire. Par la suite, une caractérisation des écosystèmes à restaurer ou à préserver doit être faite afin de déterminer la meilleure stratégie à appliquer. Pour qu'une caractérisation exacte des zones côtières puisse être faite, il faut effectuer une cartographie exhaustive de toute la superficie des milieux naturels ainsi que les milieux occupés ou modifiés par les populations humaines. Une fois que la stratégie la plus judicieuse est sélectionnée, une planification peut être effectuée quant à la mise en place des mesures. Il est également important de planifier un plan de suivi afin que, une fois les mesures concrétisées, des données soient compilées afin de confirmer l'efficacité des interventions.

Des mesures correctives pourront ainsi plus rapidement être prises si un élément perturbe toujours l'équilibre de ces puits de carbone bleu (Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026, s.d.).

**Tableau 4.1 Mesures de conservation applicables à chaque puits de carbone bleu**

<b>Puits de carbone bleu</b>	<b>Vulnérabilité</b>	<b>Mesures de conservation applicables</b>
<b>Récifs coralliens</b>	Extrêmement	AMP : - Zone de nature sauvage - Réserve naturelle intégrale - Parc national - Aire de gestion des habitats ou des espèces, avec restauration
<b>Pompe biologique</b>	Fortement	Mesures de géo-ingénierie : fertilisation des océans Diminution de la concentration atmosphérique de CO <sub>2</sub>
<b>Forêts de macro-algues</b>	Fortement	AMP : - Zone de nature sauvage - Réserve naturelle intégrale - Aire protégée de ressources naturelles gérées GIZC
<b>Marais salés</b>	Plutôt	AMP : - Zone de nature sauvage - Réserve naturelle intégrale - Parc national - Aire de gestion des habitats ou des espèces, avec restauration - Aire protégée de ressources naturelles gérées GIZC
<b>Forêts de mangroves</b>	Plutôt	AMP : - Zone de nature sauvage - Réserve naturelle intégrale - Parc national - Aire de gestion des habitats ou des espèces, avec restauration - Aire protégée de ressources naturelles gérées GIZC
<b>Pompe de solubilité</b>	Plutôt	Diminution de la concentration atmosphérique de CO <sub>2</sub>
<b>Prairies côtière</b>	Plutôt	AMP : - Zone de nature sauvage - Réserve naturelle intégrale - Parc national - Aire de gestion des habitats ou des espèces, avec restauration - Aire protégée de ressources naturelles gérées GIZC

Source : IUCN (2012). p. 3 ; Secrétariat de la Convention de Ramsar (2010).

#### 4.2.1 Aires marines protégées

Une méthode privilégiée dans la protection des écosystèmes marins contre les pressions anthropiques est la création d'aires marines protégées (AMP) (Hughes *et al.*, 2003). Cette mesure attribue un statut de protection légal pour tout ce qui est compris dans la zone intertidale délimitée par l'AMP, c'est-à-dire la faune, la flore et les composantes historiques et culturelles. Les objectifs de mettre en place ces zones protégées peuvent être pour un intérêt touristique, culturel et pédagogique, afin de sensibiliser la population vis-à-vis de la biodiversité et l'intérêt de maintenir des milieux à leur état naturel. Également, le but d'une AMP peut être d'intérêt halieutique, c'est-à-dire afin de permettre la régénération des stocks de poissons surexploités. Toutefois, l'objectif visé par la protection des puits de carbone océaniques est d'intérêt écologique, dont le but est la protection et la restauration du patrimoine naturel (Pomeroy *et al.*, 2004).

Évidemment, il reste tout de même une interaction avec les aires adjacentes à l'AMP, permettant l'échange de nutriments, mais aussi de matières polluantes. Également, l'instauration d'une AMP ne supprimera pas les conséquences liées à l'acidification et aux changements climatiques, mais cette mesure permettra au moins de réduire les menaces résultant d'activités anthropiques et d'améliorer la résilience de l'écosystème contre les autres facteurs de vulnérabilité. De plus, les espèces mobiles de la faune marine peuvent se déplacer au-delà des limites d'une AMP, où elles seront alors potentiellement pêchées, récoltées ou blessées. De là l'importance d'adopter par les autorités nationales tous les traités internationaux de protection des espèces vulnérables et menacées, et d'autant plus de reconnaître et respecter ces statuts.

En effet, certaines espèces dont le territoire de migration est transfrontalier peuvent bénéficier d'un statut de protection par l'entremise de conventions ou de traités internationaux. Toutefois, il faut que les pays signataires de ces accords respectent les quotas ou les moratoires imposés. Par exemple, le non-respect du moratoire sur la pêche baleinière déterminé par la Commission baleinière internationale et selon la Convention internationale pour la réglementation de la chasse à la baleine, que quelques-uns des pays signataires ont

choisi d'ignorer, en justifiant leurs prises par de la recherche scientifique (Black, 2007). Ce type de cas souligne l'importance pour la communauté internationale de reconnaître les espèces à statut précaire, répertoriées sur la liste rouge de l'IUCN (IUCN, 2012). Par exemple, le thon rouge de l'Atlantique (*Thunnus thynnus*) est une espèce classée menacée d'extinction selon l'IUCN (IUCN, 2012). Un outil pour imposer un moratoire sur la pêche commerciale d'espèces ayant ce statut est son inscription à l'Annexe I de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flores sauvages menacées d'extinction, ou CITES, dont la majorité des pays sont signataires (CITES, 2012). Pourtant, un moratoire sur le commerce de cette espèce n'a pu être établi, sous la pression de certains pays dont l'économie dépend de cette pêche (CITES, 2012). Malgré ces lacunes dans la protection des espèces, rien n'empêche les pays entre-temps d'augmenter la superficie de territoire marin protégé.

Plusieurs types d'AMP existent, définis selon l'autorité qui la régit et le niveau de protection. Par exemple, l'IUCN a défini six catégories d'aires protégées, selon l'intensité de la protection, dans le but d'harmoniser les efforts de conservation internationaux (voir tableau 4.1). La catégorie qui pourrait s'appliquer le mieux pour les puits de carbone les plus vulnérables est celle de réserve naturelle intégrale, l'équivalent d'une réserve écologique au Québec, qui offre une protection des plus strictes, ayant pour but la protection des ressources sauvages, et permettant l'accès seulement pour des recherches scientifiques (IUCN, 1994). Cela s'applique donc bien pour des écosystèmes vulnérables pour leur permettre une restauration naturelle et pour lesquels les connaissances sont incomplètes, ou encore pour ceux qui comportent des caractéristiques exceptionnelles et rares à étudier. Une autre catégorie d'aire protégée semblable est la zone de nature sauvage, qui vise avant tout à protéger les ressources sauvages, donc sans intervention scientifique. Ceci convient à des écosystèmes très fragiles. Ainsi, les récifs coralliens et les forêts de macro-algues pourraient bénéficier d'un de ces deux statuts, les coupant au minimum des pressions anthropiques directes.

Pour les puits de carbone plutôt vulnérables, mais qui pourraient bénéficier d'une protection accrue contre certaines pressions anthropiques, les catégories d'AMP pouvant s'appliquer à ce contexte sont d'abord la réserve naturelle intégrale et la zone de nature sauvage. Également, la création d'un parc national permet de protéger les écosystèmes qu'il englobe, tout en

permettant des activités récréatives limitées, qui ne doivent pas menacées l'intégrité du milieu protégé. Ce type de protection peut s'appliquer aux puits de carbone bleu tels les forêts de mangroves, les marais salés et les prairies côtières. Permettre des activités comme l'observation de la faune est favorable à la sensibilisation du public quant à l'importance de maintenir intacts les milieux naturels. Également, cette catégorie de protection pourrait s'appliquer pour les récifs coralliens sous la condition qu'il n'y ait aucun impact sur les coraux. La plongée sous-marine ou en apnée est une activité populaire pour observer les récifs et leur biodiversité; cela permet d'avoir un rayon d'action sensibilisante élargi. Une autre catégorie de protection semblable pour ces puits est celle de paysage marin protégé, qui a pour but de conserver un paysage marin et d'y permettre des activités récréatives, comme la plongée sous-marine. Ceci peut s'appliquer pour les récifs coralliens formant des canyons sous-marins exceptionnels, et ceux qui ont une situation favorable en étant soumis un nombre réduit de menaces (IUCN, 1994)

Enfin, les puits de carbone les moins vulnérables peuvent bénéficier de toutes les catégories d'AMP nommées précédemment, mais peuvent être également protégés par une aire de gestion des habitats ou des espèces, où le but est la conservation du milieu, mais avec des interventions de gestion. Par exemple, ceci est applicable pour un puits de carbone à restaurer, où la gestion de certaines espèces peut être nécessaire pour en favoriser une autre. Ensuite, pour les puits de carbone bleu dont les ressources sont utilisées par la population locale comme exploitation de subsistance, l'AMP créée peut être une aire protégée de ressources naturelles gérées, où il se fait une utilisation durable des écosystèmes (IUCN, 1994).

#### **4.2.2 Gestion intégrée**

Cette dernière catégorie d'AMP définie par l'IUCN rejoint la mesure protection qui est la gestion intégrée des zones côtières, ou GIZC, sur le plan de l'utilisation durable des ressources d'un écosystème côtier. Cependant, la GIZC n'accorde pas un statut de protection à l'écosystème; elle s'applique plutôt dans les zones côtières où la population humaine est déjà installée et utilise l'espace et les ressources naturelles. Dans un tel cas, la création d'une AMP ne tiendrait pas compte des contextes physiques, écologiques, biogéographiques, sociaux-

économiques et juridico-administratif comme le fait la GIZC. Cette mesure peut donc s'appliquer pour des puits de carbone bleu modifiés par l'occupation humaine, mais dont les fonctions peuvent être restaurées par une gestion durable de ses ressources et de son espace, par exemple en permettant de rétablir la connectivité entre l'eau et la côte, ou entre les îlots de nature restants. Cette approche permet également d'impliquer les parties prenantes, c'est-à-dire ceux qui utilisent et désirent préserver les ressources du milieu, ou encore ceux qui y résident. Ainsi, en tenant compte des préoccupations de ces acteurs, ceux-ci ont ensuite un intérêt à faire un suivi sur les divers projets de développement durable et ils assurent naturellement la fonction de surveillance pour le respect des règles en place (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2010).

Une GIZC permet ainsi de maintenir les fonctions et les ressources d'un écosystème, tout en y intégrant la composante anthropique. Ceci favorise les populations locales qui peuvent maintenir leur alimentation par de la pêche durable ou encore entreprendre des projets d'écotourismes. Également, d'un point de vue économique, il est à envisager que le maintien d'un milieu naturel par une gestion durable des ressources sera rentable à long terme par rapport aux coûts que cette mesure occasionne (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2010).

#### **4.3 Arguments économiques et politiques**

C'est une croyance répandue que l'économie et la protection de l'environnement sont en opposition, puisque plusieurs croient que la croissance économique doit nécessairement passer par l'exploitation des ressources naturelles. De plus, la protection de milieux naturels peut occasionner des coûts au palier de gouvernement qui en est responsable. Par exemple pour racheter les terres ou les territoires d'exploitation aux propriétaires privés, pour l'élaboration d'un plan de protection et de suivi, pour les employés qui doivent s'assurer de faire respecter la législation rattachée à une zone protégée, etc.

Dans cette optique, le développement d'une argumentation économique favorable à la protection de l'environnement est essentiel et complémentaire aux mesures de conservation mentionnées précédemment. Cela pourra servir de tournant en ces temps où l'urgence d'agir n'a jamais été aussi nécessaire et où de multiples lobbys bloquent toute mesure qui risquerait de ralentir le développement économique et l'exploitation croissante des ressources naturelles. Pourtant, la protection de l'environnement est bénéfique du point de vue économique et des méthodes d'analyses sont disponibles pour comparer les coûts et les bénéfices associés à ce genre de mesures, notamment l'analyse bénéfice-coût (ABC). En complément à ce type d'analyse, des outils sont à la disposition des gouvernements, tels des incitatifs économiques ou des politiques environnementales, afin d'avantager la mise en place de mesure de protection et de contraindre les actions anthropiques dommageables aux puits de carbone (Field et Olewiler, 2005).

#### **4.3.1 L'analyse bénéfice-coût**

Ce type d'analyse est un outil souvent utilisé pour justifier la pertinence de projets ou de programmes mis en place par un gouvernement et pour lesquels la société est la bénéficiaire. Il est important de respecter les étapes à suivre pour réaliser une bonne ABC, c'est-à-dire d'abord de bien définir la dimension du programme ou du projet, de bien décrire la quantité d'intrants et d'extrants au projet, d'estimer les bénéfices et les coûts sociétaux de ces intrants et extrants, puis finalement de comparer les bénéfices et les coûts afin d'obtenir le bénéfice net de ce programme ou projet. Cette analyse s'applique pour des projets de protection des écosystèmes, pour lesquels les bénéfices se calculent selon la réduction des dommages environnementaux suite à la mise en place d'un projet ou d'un programme, tandis les coûts sont ceux à déboursier pour effectuer un projet ou pour se conformer à un programme (Field et Olewiler, 2005).

Les bénéfices nets permettent de comparer plus d'un projet potentiel et de choisir le plus efficace en termes de bénéfices par rapport aux coûts (Field et Olewiler, 2005). Cette analyse peut aussi contribuer à déterminer la priorité des sites à protéger et à restaurer, en débutant par



les plus efficaces. Les méthodes existant pour évaluer les bénéfices peuvent aussi s'appliquer pour estimer la valeur d'un écosystème ou des biens et services qu'il fournit.

Une première méthode pour déterminer la valeur d'un bénéfice, ou d'un écosystème, est d'effectuer des sondages auprès de la population pour connaître sa volonté à payer pour utiliser, préserver ou visiter un milieu naturel, en fonction de son budget. Le prix de marché de produits de consommation est fréquemment dérivé des résultats de la volonté à payer. Cependant, cette méthode présente le désavantage que l'attribution de la valeur dépend du choix du consommateur, et le consommateur qui a un budget limité ne priorisera peut-être pas la conservation de puits de carbone bleu dans ses choix, ce concept étant plutôt abstrait et éloigné du quotidien du commun des mortels (Field et Olewiler, 2005).

Une seconde méthode permettant d'évaluer la valeur d'un milieu naturel est par la valeur économique totale, c'est-à-dire par la valeur d'usage et de non-usage (annexe 2). La valeur d'usage directe est estimée à partir de la consommation ou de l'utilisation de ressources à accès ouvert, par exemple la valeur marchande des poissons pêchés ou encore les revenus générés par des activités touristiques. Cette évaluation peut bien s'appliquer pour des mesures de conservation impliquant une gestion intégrée d'un écosystème (CCME, 2010).

Ensuite, la valeur d'usage indirecte représente les bénéfices externes, c'est-à-dire la valeur des services écosystémiques fournis par le milieu évalué. Cette valeur peut s'estimer par le coût de remplacement artificiel du bien ou du service qui était offert gratuitement par la nature, comme la protection des côtes contre l'érosion par les récifs coralliens, ou encore, le stockage du carbone atmosphérique (CCME, 2010). Ce type d'évaluation est utile pour faire valoir les risques de non-action, en vue de préserver les puits de carbone bleu, c'est-à-dire que les coûts pour réparer les conséquences des changements climatiques ou de l'acidification sont plus élevés que les coûts pour préserver les puits de carbone. La valeur actuelle des services écosystémiques côtiers est évaluée à 25 000 milliards de \$ US par an (UNEP, 2009).

Puis, la valeur de non-usage s'estime par la volonté à payer des gens pour s'assurer de l'existence d'un milieu ou d'une ressource, nommée la valeur d'existence. Il est également

possible d'estimer la volonté à payer d'une société pour s'assurer qu'une ressource soit disponible pour les générations présentes, ce qui est nommé la valeur d'altruisme. Enfin, la volonté à payer afin de garder en réserve une ressource pour les futures générations se nomme la valeur de legs. Ainsi, l'évaluation de la valeur de non-usage s'applique plutôt pour la mise en place des mesures de conservation d'écosystèmes strictes, avec la protection maximale, afin de préserver les propriétés naturelles d'origines (CCME, 2010).

#### **4.3.2 Incitatifs économiques**

Des incitations économiques peuvent être mises en place afin d'encourager les mesures de protection des puits de carbone océaniques, lorsque les bénéfices ne semblent pas compenser les coûts de ces mesures. Les incitatifs sont des outils qui rapportent de l'argent aux agents subissant les coûts de mesures de protection de milieux naturels, tandis que les désincitatifs sont des outils dits régressifs, qui impliquent un coût de plus à déboursier par les agents faisant subir des pressions aux écosystèmes ou alors ne respectant pas les mesures de protection mises en place.

Un exemple d'incitatif qui semble être prometteur est l'attribution de crédits carbone pour les tonnes de carbone séquestrées par les puits de carbone bleu. Cependant, ces tonnes de CO<sub>2</sub>eq ne sont pas encore comprises dans le calcul national de bilan carbone; leur ajout pourrait donc faire en sorte que les pays maritimes délaissent leurs efforts de réduction d'émissions de GES. Pour contrevenir à cette éventualité, il faudrait que des conditions soient émises avant que les crédits carbone générés par les puits de carbone bleu ne soient comptabilisés. Un exemple de condition serait de comptabiliser les crédits de carbone bleu pour un pays seulement une fois que ses objectifs nationaux de réduction d'émission de GES sont atteints. Également, il sera important de bonifier les études effectuées sur les puits de carbone océaniques afin de préciser l'importance du carbone séquestré par chacun. Quant aux pays en voie développement qui pourraient ne pas avoir le budget pour investir dans la protection des écosystèmes côtiers, un programme des Nations Unies du même type que le programme de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts ou REDD, qui a pour objectif la protection des forêts tropicales sur les territoires de pays pauvres, pourrait être mis en place

pour les puits de carbone bleu. Ce type de programme fonctionne par subvention, pour inciter ces pays à protéger ses milieux naturels plutôt que de les exploiter pour leur développement économique (UN-REDD, 2009).

Comme exemple de désincitatifs économiques, il existe déjà des contraintes législatives occasionnant des amendes en cas de non-respect des lois et normes environnementales. Mais il existe une mesure qui devrait être appliquée à tous les biens et services; il s'agit d'internaliser les coûts externes, notamment les coûts environnementaux. Certains de ces coûts sont internalisés par le biais de taxes aux industries, par exemple pour compenser l'utilisation de l'eau qui devra ensuite être traitée par un service public, ou encore par une taxe à la consommation, comme les écofraîs, servant à couvrir les dépenses pour le recyclage des appareils électroniques, encore une fois un service public (Vertisoft, 2012). Cependant, encore beaucoup de coûts environnementaux restent à être internalisés dans l'économie mondiale. Un exemple s'appliquant à des écosystèmes côtiers serait les coûts liés à la destruction de communautés benthiques par dragage, qui devraient être internalisés aux prix de vente des produits de cette pêche. Ou encore internaliser les coûts de l'effondrement des stocks de certaines espèces de poissons dans le prix de vente de ces mêmes espèces.

Comment est-il possible de calculer ces coûts environnementaux? D'abord, en amassant les données de la diminution des chiffres d'affaires des pêcheurs, d'activités récréotouristiques ou autres activités touristiques connexes. Il est également possible d'estimer le coût pour les populations exploitant les ressources de la mer comme alimentation de subsistance. Cela pourrait se mesurer par la distance qu'ils doivent parcourir ou le temps de plus qu'ils doivent consacrer afin de trouver la même quantité de ressource qu'auparavant, ou possiblement l'argent de plus qu'ils doivent dépenser pour se procurer les aliments manquants, auparavant disponibles. Ainsi, le coût environnemental est bien représenté par le prix d'un bien ou d'un service, qui était offert gratuitement par les milieux naturels, mais qu'il faut maintenant fournir artificiellement (Field et Olewiler, 2005).

### **4.3.3 Politiques environnementales nationales**

Un outil supplémentaire pour la protection des puits de carbone bleu et la diminution des pressions anthropiques, dans des cas où les parties prenantes y voient trop de contraintes économiques, est la mise en place de politiques environnementales par les gouvernements. Par contre, pour que ces politiques soient appropriées à la réalité des états, certains critères doivent être considérés. Les politiques mises en place doivent d'abord être efficaces dans l'atteinte de la réduction des pressions anthropiques ciblées par rapport aux coûts occasionnés par ces politiques. Ensuite, les politiques doivent être équitables pour tous les groupes de population, de même qu'elles doivent contribuer à modifier les incitatifs à l'innovation technologique pouvant réduire les coûts liés aux politiques. Puis, ces politiques environnementales doivent être applicables, c'est-à-dire que le gouvernement qui souhaite mettre en place de telles politiques doit disposer de temps, de ressources et d'institutions pour être en mesure d'appliquer ses politiques. Également, elles sont applicables seulement si elles sont adaptées à la réalité des acteurs qu'elles contraignent, par exemple pour l'application des sanctions. Finalement, les politiques environnementales doivent aussi répondre à un degré de compatibilité avec des principes moraux, par exemple, le principe de polluer-payeur est considéré plus moral que celui de subventionner les pollueurs pour qu'ils s'améliorent dans leur gestion environnementale (Field et Olewiler, 2005).

Ainsi, tout en considérant ces critères, les politiques environnementales qui devraient être mises en place pour renforcer et faciliter la protection des puits de carbone océaniques sont, par exemple, des politiques concernant la protection des rives, les pratiques agricoles, la densification urbaine, tout comme l'établissement de normes industrielles et agroalimentaires plus sévères et un objectif de réduction d'émission de GES plus élevé. De plus, des politiques visant à encourager la durabilité des ressources devraient être adoptées, par exemple l'attribution de quota de pêche ou l'adoption d'un moratoire sur certaines espèces, ou encore d'imposition des restrictions sur certaines méthodes de pêche destructrices, comme le dragage des fonds marins. Sans oublier les politiques ou les programmes visant à sensibiliser la population quant à l'importance de préserver les milieux et ressources naturelles, ainsi que

d'adopter une consommation responsable et durable, avec l'aide, entre autres, de lois sur l'affichage de la provenance des produits de la mer et de la méthode de pêche utilisée.

En résumé, de nombreuses options sont disponibles afin de gérer, de protéger et de restaurer les milieux naturels marins, notamment les puits de carbone bleu. L'application des mesures de conservation des écosystèmes marins peut être favorisée par des analyses et des incitatifs économiques, de même que des politiques environnementales. Néanmoins, les enjeux sociaux et économiques doivent aussi être considérés pour satisfaire à l'acceptabilité et la faisabilité des mesures de conservation devant être appliquées. Ceci doit donc être pris en compte lors du choix des mesures de conservation, des incitatifs et des politiques environnementales.

## **Conclusion**

Ainsi, cet exercice de rédaction a permis d'atteindre son objectif principal, c'est-à-dire d'identifier le ou les puits de carbone bleu les plus vulnérables à l'acidification des océans, et ce, afin de prévoir les efforts de conservation et de restauration pertinents à chacun. Il est toutefois à noter que tous les puits de carbone bleu, vulnérables ou non à l'acidification, sont soumis à d'autres menaces de types anthropiques ou climatiques et qu'il est impératif de les préserver pour la sauvegarde de la biodiversité, d'autant plus qu'ils offrent gratuitement un service environnemental essentiel, soit la séquestration du carbone.

La littérature consultée afin d'atteindre les objectifs de ce document a été publiée par des organisations scientifiques internationales, tel le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP), le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CDB), l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), de même que des articles scientifiques et des ouvrages faisant une synthèse du phénomène d'acidification.

Afin de réussir à évaluer la vulnérabilité des puits de carbone bleu, il a d'abord été nécessaire de répertorier et décrire les systèmes et écosystèmes marins aptes à séquestrer le carbone sur différentes échelles de temps. Cette description a ainsi permis d'identifier les éléments menaçant ces puits de carbone, ainsi que de rassembler les données disponibles sur leur efficacité de séquestration.

L'analyse a été effectuée à partir d'une grille de critères pondérés classés selon leur caractère physique, biologique ou de fragilité. La cote obtenue pour chaque critère a été additionnée pour chaque puits, ce qui a résulté en une cote de vulnérabilité. Cette cote a fourni un indice clair de l'importance des menaces que subissent les puits de carbone analysés.

Ceci a permis d'identifier les puits de carbone ayant les cotes de vulnérabilité les plus élevées, particulièrement les récifs coralliens qui sont extrêmement vulnérables, ainsi que la pompe biologique et les forêts de macro-algues, qui sont fortement vulnérables. En considérant le taux de carbone que chaque puits séquestre annuellement, la pompe biologique est le puits de carbone bleu le plus préoccupant, permettant de séquestrer environ 500 Tg C/an.

Il faut de toute évidence et le plus tôt possible mettre en place des mesures de conservation de ces écosystèmes encore intacts les plus vulnérables, de même que des mesures de restauration de ceux ayant été altérés, mais pouvant encore être rétablis. Néanmoins, ceux les moins vulnérables doivent aussi bénéficier de mesures de protection et de restauration, étant donné l'importance de préserver la biodiversité et les services écologiques rendus. En attendant que les mesures s'attaquant à la cause de l'acidification et des changements climatiques soient effectives et efficaces, les mesures pouvant être prises sont entre autres la création d'aires marines protégées, l'intégration des populations dans la gestion des écosystèmes leur fournissant des ressources essentielles, ou encore la création d'incitatifs économiques, tels que la création de crédits carbone. Des politiques environnementales peuvent également être adoptées par les gouvernements mondiaux afin de favoriser la protection des milieux naturels et renforcer les normes environnementales.

Malgré tout, les puits de carbone océaniques les plus efficaces à séquestrer du carbone et qui le séquestrent à long terme, tel que la pompe de solubilité, la pompe biologique les marais salés et les prairies côtières, devrait évidemment être priorisés dans les plans nationaux de protection des milieux naturels. Le but est bien sûr de réussir à réduire la concentration atmosphérique de gaz carbonique avec les moyens naturels existants, plutôt que de devoir mettre en place des mesures artificielles et coûteuses pour capter et stocker le carbone.

La question reste encore à savoir s'il n'est pas déjà trop tard pour réussir à renverser les processus d'acidification et des changements climatiques, mais il est certain que le coût de l'inaction aura beaucoup plus important que les coûts de la protection des puits de carbone bleu, ainsi que les coûts de toutes les mesures devant être prises pour diminuer les émissions de GES.

## Références

- AquaBase.org (2011). Dureté de l'eau, KH, GH, TAC, carbonates, effet tampon et autres joyeusetés. Notions de base. <http://www.aquabase.org/articles/html.php3/durete-eau-kh-tac-carbonates-effet-tampon-autres-joyeusetes=1092.html>. 28 octobre 2011.
- Achituv, Y. and Dubinsky, Z. (1990). Evolution and zoogeography of coral reefs. Dans *Ecosystems of the world 25, Coral reefs*, Z. Dubinsky, éd. (Amsterdam : Elsevier., Sci. Pub), pp. 1-9.
- Ayukai, T. (1998) Introduction: carbon fixation and storage in mangroves and their relevance to the global climate change – a case study in Hinchinbrook Channel in northeastern Australia. *Mangroves Salt Marshes* 2, 189-190.
- Bach, S.S., Borum, J., Fortes, M.D. et Duarte, C.M. (1998). Species composition and plant performance of mixed seagrass beds along a siltation gradient at Cape Bolinao, The Philippines. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 174, 247-256.
- Black, R. (2007). BBC News, Under the skin of whaling science. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/6667907.stm>. 13 décembre 2012.
- Boorman, L.A. (1999). Salt marshes- present functioning and future change. *Mangroves Salt Marshes* 3, 227–241.
- Bourque, P.A. (2010). Les grands cycles biogéochimiques et les changements climatiques. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycles.biogeochemiques.html>. Dans *Planète Terre* (Québec : Bourque, P.A. et Université Laval). [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html). 19 octobre 2011.
- Canadell, J.G., Le Quéré, C., Raupach, M.R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R.A. et Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 18866-18870.



- Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., Kearney, K., Watson, R. et Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish. 10*, 235–251.
- CCME (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement). (2010). Document d'orientation technique sur la valeur de l'eau. [http://www.ccme.ca/assets/pdf/water\\_valuation\\_fr\\_1.0.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/water_valuation_fr_1.0.pdf). 23 novembre 2012.
- CITES (Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flores sauvages menacées d'extinction). (2012). Les Parties à la CITES. <http://www.cites.org/fra/disc/parties/index.php>. 13 décembre 2012.
- Coale, K.H., Johnson, K.S., Fitzwater, S.E., Gordon, R.M., Tanner, S., Chavez, F.P., Ferioli, L., Sakamoto, C., Rogers, P., Millero, F. *et al.* (1996). A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 383, 495–501.
- Cushing, D.H. (1989). A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. *J. Plankton Res.* 11, 1-13.
- Dawes, C., Siar, K. et Marlett, D. (1999). Mangrove structure, litter and macroalgal productivity in a northern-most forest of Florida. *Mangroves Salt Marshes* 3, 259-267.
- Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A. et Kleypas, J.A. (2009). Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1, 169-192.
- Enríquez, S., Méndez, E.R. et Iglesias-Prieto, R. (2005). Multiple scattering on coral skeletons enhances light absorption by symbiotic algae. *Limnol. Oceanogr.* 50, 1025-1032.
- Environnement Canada. (2010a). Rapport d'inventaire national 1990-2008, Partie 1, sources et puits de gaz à effet de serre. <http://www.ec.gc.ca/Publications/492D914C-2EAB-47AB-A045-C62B2CDACC29/RapportDIinventaireNational19902008SourcesEtPuitsDeGazAEffetDeSerreAuCanada.pdf>. 12 février 2012.
- Environnement Canada. (2010b). Potentiel de réchauffement planétaire. <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=CAD07259-1>. 7 novembre 2011.

- Estes, J.A. et Duggins, D. (1995). Sea otters and kelps forests in Alaska: generality and variation in a community ecological paradigm. *Ecol. Monogr.* 65, 75-100.
- Field, B. et Olewiler, N. (2005). *Environmental Economics*. 2<sup>e</sup> édition canadienne (McGraw-Hill Ryerson).
- Gattuso, J.-P., Frankignoulle, M. et Wollast, R. (1998). Carbon and carbonate metabolism in costal aquatic ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29, 405-434.
- Gonzalez, J.M., Fernandez-Gomez, B., Fendandez-Guerra, A., Gomez-Consarnau, L., Sanchez, O., Coll-Llado, M., Del Campo, J., Escudero, L., Rodriguez-Martinez, R., Alonso-Saez, L. *et al.* (2008). Genome analysis of the proteorhodopsin-containing marine *bacterium* *Polaribacter* sp. MED152 (*Flavobacteria*): A tale of two environments. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 8724-8729.
- Graham, M.H., Kinlan, B.P., Druehl, L.D., Garske, L.E. et Banks, S. (2007). Deep-water kelp refugia as potential hotspots of tropical marine diversity and productivity. *PNAS* 104, 16576-16580.
- Grobe, H. (2006). Biological and physical pumps of carbon dioxide. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CO2\\_pump\\_hg.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CO2_pump_hg.png). 16 mars 2012.
- GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat). (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse (Genève : Pachauri, R.K. et Reisinger, A.).
- GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat). (2008). Le changement climatique et l'eau. Document technique VI du GIEC (Genève : Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. et Palutikof, J.P.).
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B.C., Kleypas, J. *et al.* (2003). Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. *Science* 301, 929-933.

- ISO (International Standard Organisation). (2006). Gaz à effet de serre - Partie 2: Spécifications et lignes directrices, au niveau des projets, pour la quantification, la surveillance et la déclaration des réductions d'émissions ou d'accroissements de suppressions des gaz à effet de serre (Genève : ISO).
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). (1994). Lignes directrices pour les catégories de gestion des aires protégées (Gland et Cambridge : IUCN).
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). (2009). The management of natural coastal carbon sinks (Gland : Laffoley, D. et Grimsditch, G.).
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). (2012). The IUCN red list of threatened species. <http://www.iucnredlist.org/>. 12 décembre 2012.
- IWC (International Whaling Commission). (2013). Conservation and management. <http://iwc.int/conservation>. 12 février 2013.
- Jokiel, P.L. et Coles, S.L. (1977). Effects of temperature on the mortality and growth of Hawaiian reef corals. *Mar. Biol.* 43, 201–208.
- Karl, D.M. et Letelier, R. (2008). Nitrogen fixation-enhanced carbon sequestration in low nitrate, low chlorophyll seascapes. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 364, 257-268.
- Karleskint, G.J., Turner, R. et Small J.W.J. (2010). Continental Shelves, Neritic Zone and Open Sea. Dans *Introduction to marine biology*, 3<sup>e</sup> édition, J. Warde, éd. (Belmont: Brooks/Cole, Cengage learning), pp. 442-485.
- Kleypas, J.A., Buddemeier, D., Archer, D., Gattuso, J.P., Langdon, C. et Opdyke, B.N. (1999a). Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284, 118-120.
- Kleypas, J.A., McManus, J.W. et Meñez, L.A.B. (1999b) Environmental limits to coral reef development: Where do we draw the line? *Amer. Zool.* 39, 146-159.
- Kroeker, K.J., Micheli, F., Gambi, M.C. et Martz, T.R. (2011). Divergent ecosystem responses within a benthic marine community to ocean acidification. *PNAS* 108, 14515-14520.

- Lavery, T.J., Roudnew, B., Gill, P., Seymour, J., Seuront, L., Johnson, G., Mitchell, J.G. et Smetacek, V. (2010). Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/early/2010/06/14/rspb.2010.0863.full.html#ref-list-1>. 3 juin 2012.
- Lee, K., Choi, S.-D., Park, G.-H., Wanninkhof, R., Peng, T.-H., Key, R.M., Sabine, C.L., Feely, R.A., Bullister, J.L., Millero, F.J. *et al.* (2003). An updated anthropogenic CO<sub>2</sub> inventory in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochem. Cycles* 17, 1116.
- Lenton, T.M. et Vaughan, N.E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 5539-5561.
- Le Quéré, C., Rodenbeck, C., Buitenhuis, E.T., Conway, T.J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N. *et al.* (2007). Saturation of the southern ocean CO<sub>2</sub> sink due to recent climate change. *Science* 316, 1735-1738.
- Marshall, A.T. et Clode, P. (2004). Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and an azooxanthellate scleractinian reef coral. *Coral Reefs* 23, 218-224.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2013). Atmospheric CO<sub>2</sub>, Mauna Loa Observatory (Scripps / NOAA / ESRL), Monthly Mean CO<sub>2</sub> Concentrations (ppm), Since March 1958. <http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/noaa-mauna-loa-co2-data.html>. 27 avril 2013.
- OQLF (Office québécois de la langue française). (2012a). Fiche terminologique : espèce clé. [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=26514338](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26514338). 17 mars 2013.
- OQLF (Office québécois de la langue française). (2012b). Fiche terminologique : sténoèce. [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8413087](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8413087). 17 mars 2013.
- Olivier, M.J. (2009). *Chimie de l'environnement*, 6e édition (Lévis : Productions Jacques Bernier).

- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). (2009). Directives internationales sur la gestion de la pêche profonde en haute mer. <http://www.fao.org/docrep/011/i0816t/i0816t00.htm>. 18 juillet 2012.
- Osborne, P.L. (2000). Tropical ecosystems and ecological concepts, Cambridge U.K. (New York: Cambridge University Press).
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F. *et al.* (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681-686.
- Orr, J.C., Caldeira, K., Fabry, V., Gattuso, J.-P., Haugan, P., Lehodey, P., Pantoja, S., Pörtner, H.-O., Riebesell, U., Trull, T. *et al.* (2009). Research priorities for ocean acidification, report from the Second Symposium on the ocean in a high-CO<sub>2</sub> world. <http://ioc3.unesco.org/oanet/HighCO2World.html>. 20 juin 2012.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37, 637-669.
- Phillips R.C. et Meñez, E.G. (1988). Seagrasses (Washington D.C. : Smithsonian Institution Press).
- Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026. (s.d.). Conservation de la biodiversité. [http://planstlaurent.qc.ca/fr/biodiversite/conservation\\_de\\_la\\_biodiversite.html](http://planstlaurent.qc.ca/fr/biodiversite/conservation_de_la_biodiversite.html). 19 novembre 2012.
- Polidoro, B.A., Carpenter, K.E., Collins, L., Duke, N.C., Ellison, A.M., Ellison, J.C., Farnsworth, E.J., Fernando, E.S., Kathiresan, K., Koedam, N.E. *et al.* (2010). The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. *Plos One* 5, 1-10.
- Pomeroy, R.S., Parks, J.E. et Watson, L.M. (2004). How is your MPA doing? A guidebook of natural and social indicators for evaluating marine protected area management effectiveness (Gland et Cambridge: IUCN).

- CDB (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique). (2010). Synthèse scientifique des impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine. (Montréal : Cahier technique CDB No 46).
- Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook B. *et al.* (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science* 305, 367-371.
- Secrétariat de la Convention de Ramsar. (2010). Manuel 12 Ramsar pour l'utilisation rationnelle des zones humides, 4<sup>e</sup> édition. (Gland : Secrétariat de la Convention de Ramsar).
- Seiter, K., Hensen, C., et Zabel, M. (2005). Benthic carbon mineralization on a global scale. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 3173.
- Smith, S.V. et Gattuso, J.P. (2009). Coral reefs. Dans *The management of natural coastal carbon sinks*, D. Laffoley et G. Grimsditch, édés. (Gland, Suisse), pp 39-45.
- Steneck, R.S., Graham, M.H., Bourque, B.J., Corbett, D., Erlandson, J.M., Estes, J.A. et Tegner, M.J. (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Env. Cons.* 29, 436-459.
- Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A., Chipman, D.W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Watson, A. *et al.* (2009). Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. *Deep-Sea Res. Pt. 56*, 554-577.
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2009). Blue carbon. A rapid response assessment (Norway: Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M. Valdés, L., DeYoung, C., Fonseca, L. et Grimsditch, G.).
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2010). UNEP Emerging issues: Environmental Consequences of Ocean Acidification: A Threat to Food Security (Nairobi: UNEP/UNON Publishing Service Section).

- UN-REDD Programme. (2009). The United Nations Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries. <http://www.un-redd.org/Home/tabid/565/Default.aspx>. 5 décembre 2012.
- Valdés L. et Moral, M. (1998). Time series analysis of copepod diversity and species richness in the Southern Bay of Biscay (Santander, Spain) and their relationships with environmental conditions. *ICES J. Mar. Sci.* 55, 783-792.
- Valdés, L., Lopez-Urrutia, A., Cabal, J., Alvarez-Ossorio, M., Bode, A., Miranda, A., Cabanas, M., Huskin, I., Anadon, R., Alvarez-Marques, F. *et al.* (2007). A decade of sampling in the Bay of Biscay: What are the zooplankton time series telling us? *Prog. Oceanogr.* 74, 98-114.
- Veron, J.E.N. (2000). Corals of the world (Australia: Australian Institute of Marine Science).
- Vertisoft. (2012). Loi sur la qualité de l'environnement. Nouvelle taxe sur les produits électroniques. <http://www.vertisoftpme.com/solutions-technologiques/nouvelles/nouvelle-taxe-sur-les-produits-electroniques.aspx>. 7 décembre 2012.
- Wells, J.W. (1956). Scleractinia. Treatise on invertebrate paleontology. Dans *Treatise on Invertebrate Paleontology*, R.C. Moore, éd. (Kansas : University of Kansas Press), pp. F328-F443.
- Wilson, R.W., Millero, F.J., Taylor, J.R., Walsh, P.J., Christensen, V., Jennings, S. et Grosell, M. (2009). Contribution of fish to the marine inorganic carbon cycle. *Science* 323, 359-362.

## Annexe 1

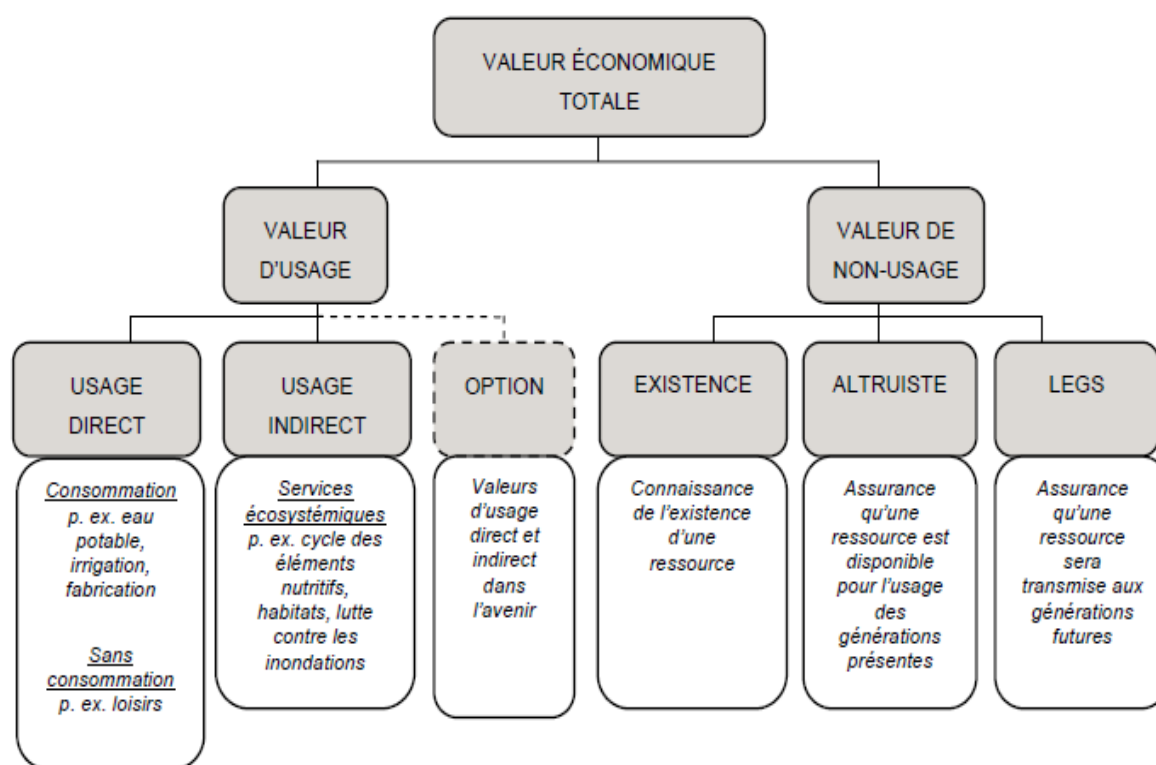
### Bibliographie

- Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J. et Millero, F.J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science* 305, 362-366.
- Guinotte J.M., Buddemeier, R.W. et Kleypas, J.A. (2003). Future coral reef habitat marginality: temporal and spatial effects of climate change in the Pacific basin. *Coral Reefs* 22, 551-558.
- Kleypas, J. et Langdon, C. (2006). Coral reefs and changing seawater carbonate chemistry. Coastal and estuarine studies, Coral reefs and climate change: science and management, Phinney, J.T., Hoegh-Guldberg, O., Kleypas, J., Skirving, W. et Strong, A., éd. (Washington, DC : American Geophysical Union), 73-110.
- Lutz, S.J. (2011). Blue Carbon - First Level Exploration of Natural Coastal Carbon in the Arabian Peninsula, with Special Focus on the UAE and Abu Dhabi. A Rapid Feasibility Study 2011 (Norway: UNEP/GRID-Arendal).
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2001). The carbon cycle. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/>. 30 novembre 2011.
- Poirier, A.G. (2010). Sclérochronologie et la relation entre le taux de calcification de *Montastraea faveolata* (Cnidaria: Scleractinia) et la température de l'eau superficielle au récif de corail Banco Chinchorro, Caraïbes mexicains (Sherbrooke : Université de Sherbrooke).



## Annexe 2

### Schéma descriptif de la valeur économique totale



**Figure A2.1** Schéma décrivant les valeurs d'usage et de non-usage applicables aux milieux naturels

Source : CCME (2010). p. vi